



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

NAYARA FRANZINI LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A
PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

NAYARA FRANZINI LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A
PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais. Orientador: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Coorientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

L864d Lopes, Nayara Franzini, 1993-
Desenvolvimento de calços de madeira laminada colada a
partir de resíduos de eucalipto / Nayara Franzini Lopes. - 2019.
81 f. : il.

Orientador: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.

Coorientador: Fabricio Gomes Gonçalves.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Adesivos. 2. Madeira. 3. Colagem. I. Segundinho, Pedro
Gutemberg de Alcântara. II. Gonçalves, Fabricio Gomes. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

**DESENVOLVIMENTO DE CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A
PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO**

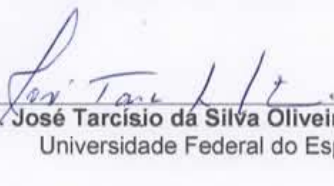
Nayara Franzini Lopes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2019.



Prof.^a Dr.^a Rejane Costa Alves (Examinadora externa)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Pedro Gutemberg de A. Segundinho (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por tudo aquilo que tenho alcançado.

Aos meus pais Rita de Cassia e Carlos Eduardo por serem o meu alicerce, acreditarem em mim e por estarem sempre me apoiando, me dando forças para realizar meus sonhos. Ao meu irmão Nickolas.

À Universidade Federal do Espírito Santo por todo aprendizado e amizades que aqui adquiri.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pela acolhida e oportunidade de realizar o mestrado.

À FAPES pela bolsa de mestrado concedida para realização de parte do projeto “Desenvolvimento de calços colados a partir de resíduos sólidos de madeira de eucalipto provenientes de serrarias” Nº FAPES: 720/2016 - EDITAL FAPES/SEAG Nº 06/2015 - PPE AGROPECUÁRIA.

Ao meu orientador, professor Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela atenção, dedicação e por me dar a oportunidade de ter desenvolvido esse trabalho.

Aos professores, por compartilharem seus conhecimentos e contribuírem para meu aprendizado.

Aos membros da banca, por terem aceitado me avaliar.

Aos funcionários da UFES, senhor José Geraldo e senhor Elecy, por me atenderem prontamente todas as vezes que precisei.

Aos alunos da Engenharia Industrial Madeireira, Fernanda Catein, Flávia de Souza, Gabriel Zuqui e Ramon Ferreira que ajudaram na realização do trabalho.

Ao Vinicius Taqueti por todo auxílio.

À minha segunda família, Madalena, Domingos, Adalberto, Alessandra, Angélica, Andréia e Alciléia por terem me acolhido quando precisei e por ajudarem a me tornar quem sou hoje.

Ao meu melhor amigo e namorado Gerhard, que esteve sempre presente em todos os momentos, me ajudando e me aconselhando. Obrigada por todo carinho, companheirismo e por tudo que fez e faz por mim.

À minha companheira de apartamento e amiga, Daniela Minini, por tudo que compartilhamos e vivemos. Pelas boas risadas e comilanças.

À Rosane que me acolheu assim que cheguei em Jerônimo Monteiro. À Glícia Nascimento, essa pessoa maravilhosa e de grande coração.

A toda a turma de pós-graduação de 2017. Em especial à Aline Ramalho, essa pessoa aparentemente calma e meiga, mas que tem as melhores respostas. Ao Caio de Moraes, que está presente há vários anos em minha vida. À Daiana Souza, essa baiana arretada. À Elbya Gibson por toda amizade e loucuras. À Lhorayne Gomes que sempre foi a mais responsável. À Maricélia Moreira, essa amapaense que se tornou tão especial na minha vida. À Patrícia Borges, que está sempre presente e que topa qualquer coisa. Ao Rodrigo Gorsani, por toda essa alegria contagiante.

A todas outras pessoas não citadas aqui, mas que direta ou indiretamente auxiliaram na realização desse trabalho. A todos vocês, meu muito obrigada.

RESUMO GERAL

LOPES, NAYARA FRANZINI. **DESENVOLVIMENTO DE CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Coorientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves.

Os calços de madeira são utilizados como separadores entre chapas de aço e perfis metálicos na estivagem e no armazenamento, sendo atualmente constituídos de peças de madeira maciça serrada. Porém, a redução da oferta de madeira proveniente de espécies nativas e a incapacidade das espécies de reflorestamento em abastecerem o mercado com peças de boa qualidade levou ao uso de técnicas alternativas para melhor aproveitamento da madeira. Tem-se a técnica de madeira laminada colada (MLC), que é a colagem de madeiras a partir da associação de peças que são selecionadas e dispostas com as fibras paralelas entre si para colagem por meio de adesivos com uso de prensagem, uma alternativa para substituir o uso de madeira maciça. Sabe-se que esta técnica tem um apelo relevante em função do potencial de uso já consagrado em estruturas de madeira, no que diz respeito a produção de elementos estruturais. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo desenvolver um tipo de calço com o uso da tecnologia da colagem de resíduos sólidos de madeira de eucalipto provenientes de serrarias capaz de garantir a segurança no armazenamento e na estivagem de placas de aço e perfis metálicos. Para isso foi feita uma caracterização das propriedades físicas da madeira, determinando-se a densidade aparente, o teor de umidade e a retratibilidade. Os ensaios mecânicos foram realizados visando avaliar a resistência à compressão normal às fibras, resistência à compressão paralela, resistência ao cisalhamento na madeira e na linha de cola em duas condições de umidade (seca e saturada), além do ensaio de delaminação. Foram realizados ensaios não destrutivos de vibração transversal livre, vibração longitudinal e “stress wave” nos calços. A madeira do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *grandis* possui boas propriedades físicas, que permitem seu uso para confecção de elementos de MLC. Os resultados mostraram uma alta resistência dos adesivos na condição seca, não sendo encontrado o mesmo desempenho quando ensaiados na condição saturada. Os calços de resíduos

apresentaram resultados satisfatórios quando comparados aos calços de MLC com lâmina inteiras, sendo um bom substituto aos calços já existentes.

Palavras-chave: MLC, adesivo, propriedades físicas e mecânicas, ensaios não destrutivos.

GENERAL ABSTRACT

LOPES, Nayara Franzini. **Development of glued laminated timber dunnage with eucalyptus waste**. 2019. Dissertation (Masters in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho. Co-advisors: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves.

Timber dunnage are used as separators between steel plate and metal profiles in the stowage and storage and are currently made up of pieces of solid sawn timber. However, the reduction of the offer of native species wood to and the inability of the reforestation species to provide pieces of wood with good quality to the market led to the use of alternative techniques for better use of wood. Then there is the technique of glued laminated timber (Glulam) which is the gluing of woods from the association of pieces that are selected and arranged with the fibers parallel to each other for gluing using adhesives and pressing, that can to substitute the solid wood. It is known that this technique has a relevant appeal in terms of the potential of use already established in wood structures. So, this work aimed to develop a type of dunnage with the use of the technology of gluing eucalyptus wood waste from sawmills capable of ensure the safe storage and stowage of steel plates and metal profiles. For this, we made a characterization of the physical properties of the wood, determining the apparent density, the moisture content and the shrinkability. The mechanical tests were performed aiming to evaluate the resistance to normal compression to the fibers, the resistance to parallel compression, the shear strength in wood and in the glue line in two conditions of humidity (dry and saturated), besides the delamination test. Non-destructive tests of free transverse vibration, longitudinal vibration and stress wave in the dunnage were performed. *Eucalyptus urophylla* x *grandis* wood has good physical properties, which allows its use for making Glulam elements. Results showed a high resistance of the adhesives in the dry condition, not being found the same performance

when tested in the saturated condition. Dunnage made of waste presented satisfactory results when compared to the Glulam dunnage made with an entire lamina, being a good substitute for the existing ones.

Keywords: glued laminated wood, adhesive, physical and mechanical properties, non-destructive testing.

Lista de Tabelas

CAPÍTULO I: ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO.....	28
--	----

Tabela 1: Valores médios para a densidade aparente, teor de umidade, retração e inchamento tangencial e radial para a madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	41
--	----

Tabela 2: Valores médios dos módulos de elasticidade obtidos por ensaios de vibração longitudinal e vibração transversal na madeira laminada colada.....	43
--	----

Tabela 3: Média para o percentual de falha na madeira.....	49
--	----

CAPÍTULO II: ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO.....	55
--	----

Tabela 1: Valores médios para a densidade aparente, teor de umidade, retração e inchamento tangencial e radial para a madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	69
--	----

Tabela 2: Valores médios dos módulos de elasticidade obtidos por ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal e “Stress wave” na madeira laminada colada.....	70
---	----

Tabela 3: Média para o percentual de falha na madeira.....	75
--	----

Lista de Figuras

REVISÃO DE LITERATURA.....	17
Figura 1: Calços de madeira no armazenamento de chapas de aço e perfis metálicos.....	18
Figura 2: Calços de madeira na estivagem de chapas de aço e perfis metálicos.....	19
Figura 3: Esquema de montagem de uma viga de madeira laminada colada.....	20
CAPÍTULO I: ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO.....	28
Figura 1: Esquema de confecção dos calços de MLC de eucalipto.....	32
Figura 2: Esquema de retirada dos corpos de prova dos calços de MLC.....	34
Figura 3: Representação do corpo-de-prova de compressão normal às fibras.....	37
Figura 4: Representação do corpo-de-prova de compressão paralela às fibras.....	37
Figura 5: Representação do corpo-de-prova de cisalhamento paralelo às fibras.....	38
Figura 6: Representação do corpo-de-prova de cisalhamento na linha de cola.....	39
Figura 7: Representação do corpo-de-prova de delaminação.....	40
Figura 8: Valores médios de resistência à compressão normal às fibras.....	44
Figura 9: Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras.....	46
Figura 10: Valores médios de resistência ao cisalhamento na madeira.....	47
Figura 11: Valores médios de resistência ao cisalhamento na linha de cola.....	48
Figura 12: Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola. a) Adesivo poliuretano na condição seca e saturada; b) Adesivo resorcinol-formaldeído na condição seca e saturada.....	50
Figura 13: Corpos de prova colados com PUR e RF, respectivamente, após o ensaio de delaminação.....	51
CAPÍTULO II: ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO.....	55
Figura 1: Esquema de confecção dos calços de resíduos de MLC de eucalipto.....	59
Figura 2: Etapas de preparação dos blocos de madeira laminada colada. a) Aplicação do adesivo; b) Espalhamento do adesivo; c) Montagem dos calços de resíduos de madeira laminada colada - MLC; d) Aplicação de pressão constante.....	60

Figura 3: Esquema de retirada dos corpos de prova dos calços de MLC.....	62
Figura 4: Representação do corpo-de-prova de compressão normal às fibras.....	65
Figura 5: Representação do corpo-de-prova de compressão paralela às fibras.....	65
Figura 6: Representação do corpo-de-prova de cisalhamento paralelo às fibras.....	66
Figura 7: Representação do corpo-de-prova de cisalhamento na linha de cola.....	67
Figura 8: Representação do corpo-de-prova de delaminação.....	68
Figura 9: Valores médios de resistência à compressão normal às fibras.....	71
Figura 10: Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras.....	72
Figura 11: Valores médios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.....	73
Figura 12: Valores médios de resistência ao cisalhamento na linha de cola.....	74
Figura 13: Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola. a) Condição de umidade - seca; b) Condição de umidade – saturada.....	76
Figura 14: Corpos de prova após o ensaio de delaminação apresentando falha na linha de cola.....	77

Sumário

1. INTRODUÇÃO GERAL	14
1.2 OBJETIVO GERAL	16
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Calços de Madeira	17
2.2 Madeira laminada colada	19
2.3 Madeiras de reflorestamento	21
2.4 Adesivos para colagem	23
3. REFERÊNCIAS	24
Capítulo I - ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO	28
1. INTRODUÇÃO	29
2. MATERIAL E MÉTODOS	30
2.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira	30
2.2 Adesivos empregados e confecção dos elementos colados	32
2.3 Caracterização das propriedades mecânicas da madeira laminada colada	33
2.3.1 Ensaio de vibração transversal livre	34
2.3.2 Ensaio de vibração longitudinal	35
2.3.3 Ensaio de “stress wave”	36
2.3.4 Ensaio de compressão normal às fibras	36
2.3.5 Ensaio de compressão paralela às fibras	37
2.3.6 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	38
2.3.7 Ensaio de cisalhamento na linha de cola	38
2.3.8 Ensaio de delaminação	39
2.4 Análise estatística	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.1 Propriedades físicas da madeira	41
3.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira laminada colada	43

3.2.1 Ensaio não destrutivos	43
3.2.2 Compressão normal às fibras	44
3.2.2 Compressão paralela às fibras	45
3.2.3 Cisalhamento paralelo às fibras da madeira	47
3.2.4 Cisalhamento na linha de cola	48
3.2.5 Delaminação	51
4. CONCLUSÕES	52
5. REFERÊNCIAS	52
Capítulo II - ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO ...	55
1. INTRODUÇÃO	56
2. MATERIAL E MÉTODOS	57
2.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira	58
2.2 Adesivos empregados e confecção dos elementos colados	59
2.3.1 Ensaio de vibração transversal livre	62
2.3.2 Ensaio de vibração longitudinal	63
2.3.3 Ensaio de “stress wave”	64
2.3.4 Ensaio de compressão normal às fibras	64
2.3.5 Ensaio de compressão paralela às fibras	65
2.3.6 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	66
2.3.7 Ensaio de cisalhamento na linha de cola	66
2.3.8 Ensaio de delaminação	67
2.4 Análise estatística	68
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
3.1 Propriedades físicas da madeira	68
3.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira laminada colada	70
3.2.1 Ensaio não destrutivos	70
3.2.2 Compressão normal às fibras	71
3.2.2 Compressão paralela às fibras	72

3.2.3 Cisalhamento paralelo às fibras da madeira	73
3.2.4 Cisalhamento na linha de cola	74
3.2.5 Delaminação	76
4. CONCLUSÕES	77
5. REFERÊNCIAS	77
6. CONCLUSÕES GERAIS	81

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Espírito Santo sedia o maior complexo portuário da América Latina e é apontado como um dos mais eficientes do país. Os portos são especializados em carga e descarga de grãos, graneis líquidos (gasolina, óleo diesel, soda cáustica, containers, celulose, automóveis e aço (SINDAMARES, 2017). Os produtos siderúrgicos são distribuídos no mercado externo via transporte marítimo e dentre as despesas que influenciam no valor do custo de embarque de produtos siderúrgicos no terminal tem-se os estivadores/conferentes, transporte entre usina e porto, calços de madeira, empilhadeiras, *Demurrage/Despatch*, entre outros.

Os calços de madeira são utilizados como separadores entre chapas de aço e perfis metálicos na estivagem e no armazenamento. São constituídos de peças de madeira serrada maciça com seção transversal quadrada de arestas iguais variando de 8 cm a 10 cm e comprimentos variáveis iguais a 100 cm, 130 cm e 150 cm, sendo o calço de madeira de dimensões iguais a 10 cm x 10 cm x 100 cm o mais utilizado na estivagem e no armazenamento (PIZZOL, 2011). Esses calços são submetidos a esforços de compressão normal às fibras da madeira, sendo esta, a principal propriedade mecânica da madeira a ser avaliada nas condições de projeto.

Por muito tempo, a aplicação dos calços de madeira nessa situação não apresentou maiores problemas, pois eram produzidos a partir de madeiras nativas, madeiras de “lei”, de alta resistência. Atualmente o comportamento de algumas pilhas de chapas tem merecido a atenção dos trabalhadores, pois, há algumas ocorrências de instabilidade e deformações excessivas que têm sido relatadas, sendo acompanhada de fatos que podem levar a ocorrência de sérios acidentes (PIZZOL, 2011).

Devido a forma de uso desses calços, é necessária que a sua fabricação tenha uma boa qualidade de acabamento, resistência mecânica e que tenha certificação fitossanitária, portanto não seja constatada pela fiscalização a presença de cascas, galerias de inseto ou mofo na madeira, isto é, defeito que impeça o transporte do produto na alfândega e acarretem insegurança no armazenamento e na estivagem (BRASIL, 2015).

O problema é que, como em todo o mercado de madeira sólida brasileiro, os fornecedores de calços têm vivido os efeitos da escassez de madeira nativa. Atualmente existe pouca oferta de madeira de reflorestamento de alta resistência e

densidade, como por exemplo, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus cloeziana*. Essas espécies de madeira atendem as necessidades, entretanto, a oferta desse material no mercado não consegue suprir a demanda (PIZZOL, 2011). Uma das soluções para melhorar a qualidade dos calços de madeira, é o emprego de novas espécies, como por exemplo, o híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e redimensionamentos dos calços de madeira, acompanhados do desenvolvimento dos mesmos.

Uma das técnicas para aproveitar uma grande quantidade de peças de madeira com pequenas dimensões e a utilização qualitativa das peças, usando as de maior classe de resistência nas regiões mais solicitadas, é a colagem de madeiras. A madeira laminada colada (MLC) é um produto industrializado que pode ser produzido a partir de todas as espécies de madeira em diversas idades, isto é, pode ser produzido a partir de madeira obtida de árvores jovens e de pequeno diâmetro. Assim, a dependência da madeira de árvores com maior idade, consideradas necessárias para fornecer uma alta resistência e grande envergadura para o projeto arquitetônico, é uma coisa do passado, conforme Yang et al., (2008).

De acordo com Moody e Hernandez (1997), *The Engineered Wood Association* (APA) (2014); Shmulsky e Jones (2011), a MLC é um produto versátil, com várias formas para elementos estruturais; possibilita a aplicação de contra-flechas durante o processo de fabricação; tem baixa relação peso-resistência; é resistente a agentes corrosivos e ao fogo; tem boa eficiência térmica e estabilidade dimensional.

Para a fabricação desses produtos industrializados é necessária uma atenção especial ao que se refere a interação entre a madeira e os adesivos utilizados na fabricação de produtos colados, principalmente em relação à madeira de florestas plantadas (ALBINO; MORI; MENDES, 2010). É comumente utilizado no Brasil o adesivo resorcinol-fenol-formaldeído (RFF) para produção da MLC. Pode-se encontrar também a melamina-ureia-formaldeído (MUF), bi-componente, que traz como vantagens um menor tempo de cura e uma linha de cola transparente após a catalisação e o adesivo poliuretano com forte potencial para produção de MLC (MIOTTO; DIAS, 2009).

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um tipo de calço com o uso da tecnologia da colagem de resíduos sólidos de madeira de eucalipto provenientes de serrarias.

1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar as propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e mecânicas da madeira laminada colada (MLC) produzidas de lâminas contínuas e de resíduos;
- Comparar as propriedades mecânicas das madeiras produzidas com os adesivos poliuretano de mamona e resorcinol-formaldeído;
- Produzir os calços utilizando os resíduos de madeira de eucalipto e adesivo poliuretano;
- Realizar os ensaios de delaminação para avaliar a qualidade das linhas de cola dos calços fabricados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Calços de Madeira

O complexo portuário do Estado do Espírito Santo é o maior da América Latina e é apontado como um dos mais eficientes do país. O complexo agrupa seis portos e terminais por onde circulam, aproximadamente, 25% das mercadorias que entram e saem do Brasil e 12% da receita cambial nacional. O crescimento das exportações via Espírito Santo supera o do País (SINDAMARES, 2019).

Do ponto de vista geográfico, tem localização estratégica ficando perto dos principais centros consumidores, produtores e distribuidores do país. Além disso, possui uma malha ferroviária (Estrada de Ferro Vitória-Minas e Ferrovia Centro-Atlântica) e duas rodovias federais (BR-101 e BR-262). Essas características levam o Estado a funcionar como um corredor logístico tanto para o mercado interno quanto para o mercado externo.

Os principais produtos exportados pelos portos capixabas são minério de ferro, granito, produtos siderúrgicos e celulose (MARÇAL, 2006). Além de serem especializados em carga e descarga de grãos e automóveis, conta ainda, com pátios para montagem e armazenamento de peças e equipamentos.

Os calços de madeira têm utilidades no setor de produtos siderúrgicos como separadores entre chapas de aço nos portos, embarcações e pátios da usina. Possuem dimensões padrões com arestas de 10 cm e 1 m de comprimento com seção transversal quadrada de madeira serrada. São adquiridos de fornecedores externos e, normalmente utilizados em condições de umidade acima do ponto de saturação das fibras (madeira verde) (PIZZOL; NOGUEIRA; LOMBARDI, 2011).

Ao serem montadas as pilhas de placas de aço ou chapas metálicas, os calços de madeira sofrem esforços de compressão normal às fibras ao longo do comprimento, sendo esta propriedade importante para o bom desempenho. A respeito do grande número de esforços que podem ocorrer, a compressão normal às fibras é aquela que, prioritariamente, deve ser levado em consideração no dimensionamento dos calços, posto que, em uma situação de geometria ideal e cargas estáticas, quando as deformações e imperfeições são mínimas, os esforços laterais são desprezíveis. É certo que outros esforços podem se desenvolver sobre os calços, uma vez que a sua geometria não é perfeita e a colocação desses no momento da montagem é inadequada. Os esforços de natureza cisalhante podem ocorrer tanto no sentido

longitudinal da pilha (e transversal ao comprimento dos calços), quanto lateralmente ou ainda simultaneamente. Os esforços mais complexos como torção e flexão podem também ocorrer como consequência de pequenas imperfeições na geometria dos calços ou das deformações elásticas ou permanentes que resultam das cargas exercidas pelas chapas de aço e perfis metálicos (PIZZOL, 2011).

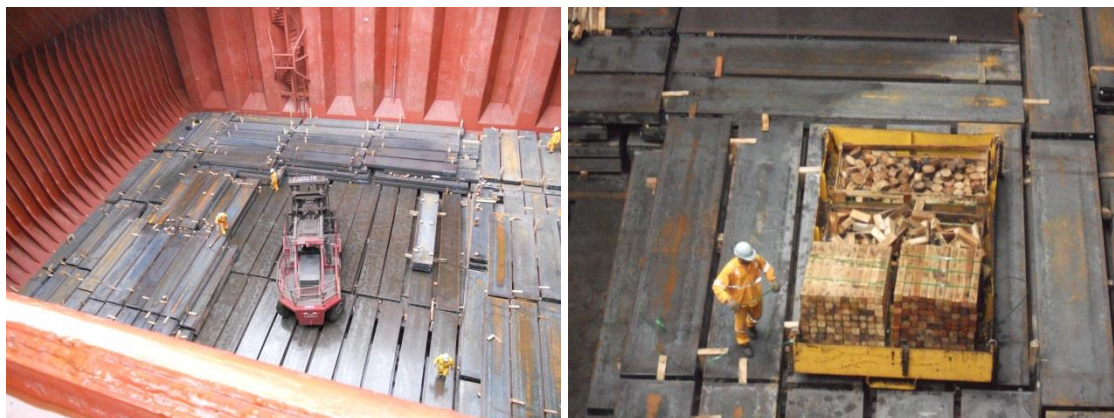
Na estratégia de pesquisa e desenvolvimento estudam-se alternativas tecnológicas de baixo impacto ambiental para materiais e equipamentos, para reduzir com segurança os custos. Um dos produtos que as empresas do setor de exportação de placas de aço e perfis metálicos consomem em grande quantidade são os calços de madeira utilizados no armazenamento e na estivagem, sendo os estudos existentes limitados ao carregamento de caixas em pallets (BISCHOFF et al., 1995) e (BISCHOFF; DOWSLAND, 1982), caixas em contêineres (GEORGE; ROBINSON, 1980) e contêineres em navio (WILSON et al., 2001). As Figuras 1 e 2 ilustram a montagem das pilhas de chapas de aço e perfis metálicos utilizando os calços de madeira no armazenamento e na estivagem.

Figura 1. Calços de madeira no armazenamento de chapas de aço e perfis metálicos.



Fonte: Segundinho, 2016.

Figura 2. Calços de madeira na estivagem de chapas de aço e perfis metálicos.



Fonte: Segundinho, 2016.

2.2 Madeira laminada colada

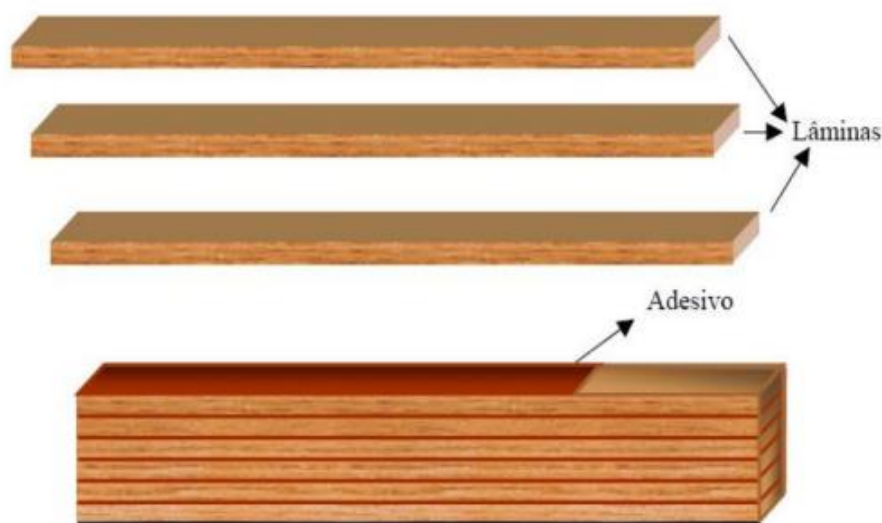
A madeira laminada colada (MLC), conhecida também como *glued laminated timber* ou *glulam*, é um dos produtos engenheirados de madeira (PEM) mais antigo utilizado no setor da construção civil. Caracteriza-se pela abrangência de dimensões e por possuir uma variedade de formação de peças estruturais (TELES, 2009).

No Brasil, a primeira indústria de MLC foi a Esmara Estruturas de Madeira Ltda, fundada em 1934 em Curitiba (PR) com tecnologia trazida por alemães (TELES, 2009). Apesar de ser um produto do século XIX, a MLC possui hoje apenas quatro indústrias, sendo uma no Rio Grande do Sul, uma em Goiás e duas no estado de São Paulo (CALIL NETO, 2014).

Os elementos estruturais são formados por lâminas de madeira de determinada seção transversal, unidas entre si, com o emprego de adesivo entre suas camadas e aplicação de pressão. Estas lâminas, que devem ter espessura inferior a 50 mm, são de tamanhos relativamente pequenos quando comparados com a dimensão final da peça e são coladas tendo suas fibras orientadas de forma que estejam paralelas entre si (Figura 3) (FIORELLI e DIAS, 2011; CALIL NETO, 2011).

A madeira laminada colada é utilizada em coberturas, pilares de estruturas, como elementos estruturais de pontes, torres de transmissão, edifícios, embarcações, bem como partes decorativas, esquadrias e móveis (TELES, 2009). Tudo isso, devido a sua capacidade de adaptar-se a diferentes formas e apresentar alta resistência a solicitações mecânicas, em razão de possuir peso relativamente baixo (ZANGIÁCOMO; LAHR, 2007).

Figura 3. Esquema de montagem de uma viga de madeira laminada colada.



Fonte: ZANGIÁCOMO, 2003.

As vigas estruturais de Madeira Laminada Colada (MLC) surgiram no final do século XIX, através do carpinteiro suíço Otto Hetzer, as quais eram confeccionadas com cola de caseína; as vigas apresentavam-se como uma forma racional de emprego da madeira na construção de estruturas, obtida pela associação de peças. Essa técnica facilita a construção de grandes estruturas com dimensões e formas variadas, limitadas apenas ao local onde serão fabricadas e ao meio de transporte utilizado. Para tanto, a confecção de vigas estruturais de madeira laminada colada é limitada pela qualidade da matéria prima disponível no mercado, pelo seu alto preço e pela falta de conhecimento e investimento em equipamentos de classificação de peças que proporcionam o aumento dos coeficientes de resistência da viga de forma significativa (CUNHA; MATOS, 2010).

Praticamente todas as madeiras podem ser coladas, sendo as coníferas e algumas folhosas mais aconselhadas para o emprego em MLC. Porém as características físicas e químicas de algumas espécies exigem o emprego de colas especiais ou a modificação daquelas que já são normalmente comercializadas para uso em madeira. (CALIL NETO, 2011).

A MLC viabiliza a utilização de madeiras de reflorestamento e de madeiras de baixa a média massa específica que, na confecção do produto, confere rigidez suficiente para aplicação estrutural (TIENNE et al., 2011).

Anshari et al. (2012) ressaltam que a colagem das lâminas de madeira reduz a variabilidade do produto final, reduzindo o efeito de características negativas da

madeira, como os nós e os efeitos da secagem, como rachaduras e empenamentos. Além disto, os autores destacam o potencial do material, que pode ser desenvolvido para os mais diversos projetos e com as mais diversas dimensões. Dentre outras vantagens da MLC, Miotto e Dias (2009) destacam a variabilidade de formas incluindo peças curvas, possibilidade de aplicação de contra flechas, redução dos defeitos inerentes da madeira, racionalização do uso da madeira e elevação da qualidade final do produto.

Por outro lado, a MLC apresenta desvantagens como alto custo e o tempo de produção, uma vez que sua produção exige equipamentos especiais, adesivos e mão-de-obra especializada, além de requerer um controle rigoroso de todas as fases do processo produtivo para assegurar a alta qualidade do produto acabado.

Apesar do rigoroso controle sobre as matérias-primas e o processo de produção, os elementos estruturais de madeira colada apresentam certa variabilidade nas propriedades mecânicas inerentes ao próprio material empregado. Assim sendo, é fundamental verificar se as propriedades mecânicas definidas em projeto foram atendidas. Segundo a norma canadense (CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION - CAN/CSA 0177, 2006), o produto acabado pode ser testado em condições laboratoriais; portanto, é necessário o controle de qualidade na produção de forma que as propriedades físicas e mecânicas da madeira colada sejam adequadas àquelas especificadas nas normas vigentes.

2.3 Madeiras de reflorestamento

O setor brasileiro de árvores plantadas possui uma área de 7,84 milhões de hectares de reflorestamento, sendo responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e 6,2% do PIB Industrial no País e, também, é um dos segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde (IBÁ, 2017).

Em relação as áreas de reflorestamento no Brasil, os gêneros de maior destaque são o *Pinus* e o *Eucalyptus* devido ao seu rápido crescimento, boa qualidade da madeira e sua capacidade de se adaptar ao clima e solo, principalmente das regiões Sul e Sudeste (VALVERDE, 2008). Acácia, teca, seringueira e paricá estão entre as outras espécies mais plantadas no país.

Segundo o relatório do Instituto Brasileiro de Árvores - IBÁ (2017), os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). Os plantios de pinus ocupam 1,6 milhão de hectares e concentram-se principalmente no Paraná (42%) e em Santa Catarina (34%). No Espírito Santo a área plantada de eucalipto representa 233.770 hectares e a de pinus corresponde a 2.500 hectares.

De acordo com Terezo e Szücs (2010) a madeira de pinus é a principal matéria prima para confecção da maioria dos elementos estruturais em MLC no Brasil, porém a madeira de *Eucalyptus sp.* surge com potencial para ser utilizada na fabricação de MLC devido a sua procedência de florestas plantadas e a suas propriedades físicas e mecânicas.

O gênero *Eucalyptus* compreende um grande número de espécies e pode ser cultivado em diversos climas e tipos de solos. Por ser uma espécie de rápido crescimento, favorece a sua produtividade (SILVEIRA, 2008). Além disso, possui características distintas tornando-o adequado para diversos fins, entre as quais se destacam a laminação, a movelaria, as estruturas, a caixotaria, os postes, as escoras, os mourões e o carvão (ALZATE, 2004).

Dentre as espécies mais utilizadas em plantios comerciais destacam-se o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Corymbia citriodora* e clones de várias espécies com características desejáveis sobre ponto de vista silvicultural e para produção de madeira. No Brasil, a madeira de *E. grandis* é utilizada para produção de formas de concreto, carpintaria, estruturas de telhados, caixaria, embalagens e pallets. Em menor escala, são produzidos móveis rústicos, estrados para camas, forros, cabos de ferramentas, vigas laminadas coladas, escadas, molduras de móveis, brinquedos, entre outros (IWAKIRI; PRATA, 2008).

Para construção civil em geral, há um grande número de espécies adequadas, como por exemplo, *Eucalyptus alba*, *E. camaldulensis*, *E. cloeziana*, *C. citriodora*, *E. deglupta*, *E. maculata*, *E. microcorys*, *E. paniculata*, *E. botryoides*, *E. pilularis*, *E. resinífera*, *E. robusta*, *E. tessellaris*, *E. tereticornis* (PAIVA et al., 2011).

2.4 Adesivos para colagem

O processo de colagem envolve três elementos importantes: adesivo, aderente e adesão. Sendo que o adesivo é uma substância capaz de unir dois ou mais elementos superficialmente, ou seja, substâncias com propriedades aderentes. Os aderentes são os materiais sólidos capazes de se ligarem por meio de adesivos; e adesão é a interação entre superfícies sólidas e uma segunda fase, que consiste de partículas individuais como moléculas, pequenas gotas, pó etc (IWAKIRI, 2005).

Frihart e Hunt (2010) explicam que o adesivo é responsável pela adesão das lâminas de madeira, que envolve fatores químicos e mecânicos. Esses adesivos são utilizados na montagem de móveis e armários, fabricação de produtos engenheirados de madeira e construção de estruturas residenciais e comerciais.

Os adesivos mais utilizados no Brasil são o resorcinol-fenol-formaldeído (RFF) e o melamina-uréia-formaldeído (MUF). A MUF apresenta como vantagem o tempo inferior para a cura e linha de cola transparente após a cristalização (MIOTTO; DIAS, 2009). Adesivos a base de polímeros de isocianato (EPI), acetato de polivinila (PVA), etileno acetato de vinila (EVA) e butadieno estireno (SBR) também são utilizados segundo Gao et al. (2010).

Na colagem de madeiras para uso estrutural, em ambientes internos e externos, o adesivo sintético à base de resorcinol é o mais recomendado (PETRAUSKI, 2012). O adesivo à base de resorcinol-formaldeído é classificado como termoendurecedor ou termofixo, pois se apresenta com modificações químicas e físicas irreversíveis, que o torna rígido e insolúvel, através de reação de policondensação (PIZZI e MITTAL, 1994).

Pode-se destacar também o adesivo produzido a partir de poliuretano líquido (PUR). Trata-se de um adesivo isento de formaldeído, produzido a partir de solventes e que pode ser aplicado em funções estruturais. Uma grande vantagem do poliuretano líquido é o tempo de cura reduzido, que pode ser de 30 minutos de aplicação mais 75 minutos de prensagem (PURBOND, 2013).

Os adesivos poliuretanos podem ser derivados do petróleo ou obtidos de óleos vegetais como soja, canola, milho, palma e mamona (LUO et al., 2008). Como destaque tem-se o adesivo de poliuretano derivado do óleo da mamona, sendo um material que não possui solvente, biodegradável e procedente de matéria-prima renovável. O óleo de mamona utilizado na fabricação do adesivo é obtido da semente

da planta, *Ricinus communis*, encontrada em regiões tropicais e subtropicais, sendo uma alternativa para substituir os adesivos derivados de origem não natural (AZAMBUJA, 2006 e MARINHO et al., 2013).

Os adesivos devem ser escolhidos considerando as condições climáticas de uso (classes de uso), a espécie de madeira, o preservativo usado e os métodos de fabricação. Segundo a NCh2148 (2010 citado por CALIL NETO, 2011), as classes de uso nas quais os elementos estruturais laminados podem se enquadrar são classe de uso 1 (interior), classe de uso 2 (exterior coberta) e classe de uso 3 (exterior).

2.4 CONSIDERAÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o que foi exposto na revisão bibliográfica, pode-se concluir que é extremamente necessário a busca por calços que tenham uma boa resistência e estabilidade durante o uso.

A colagem de madeiras é uma solução para que se possa confeccionar elementos de madeira com peças de menores dimensões.

A MLC pode ser fabricada a partir da madeira de *Pinus* e de *Eucalyptus*, ambas provenientes de fontes renováveis e disponíveis com abundância no mercado brasileiro.

Adesivos à base de resorcinol são os mais utilizados para fins estruturais, porém estudos com adesivos naturais como o poliuretano de mamona, já vem sendo desenvolvidos.

3. REFERÊNCIAS

ALBINO, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, set. 2010.

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ANSHARI, B.; GUAN, Z.; KITAMORI, A.; JUNG, K.; KOMATSU, K. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. **Constr. Build. Mater.**, v 29, p. 24-32, 2012.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Structural Panel and Engineered Wood Yearbook**. APA Economics Report E175. Disponível em: <<http://www.apawood.org>>. Acesso em: 12 set. 2017.

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 128 p. Tese (Doutorado) – IQSC, São Carlos, 2006.

BISCHOFF, E. E.; JANETZ, F.; RATCLIFF, M. S. W. Loading pallets with nonidentical items. **European Journal of Operational Research**, vol. 84, p. 681-692, 1995.

BISCHOFF, E.; DOWSLAND, W. B. An application of the micro to product design and distribution. **Journal of Operational Research Society**, vol. 33, p. 271-280, 1982.

BRASIL. Instrução Normativa nº 32 de 23 de setembro de 2015. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2015.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL NETO, C. **Ligações com Parafusos Auto Atarraxantes sem Pré-Furação para uso em Estruturas de Madeira**. 2014. 326 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION - **CAN/CSA 0177**: Qualification Code for Manufactures of Structural Glued – Laminated Timber. Alberta. 2006. 56p.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("*stress wave timer*"). **R. Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n. 2, p. 345-354. 2010.

FIORELLI, J., DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**. v. 44, p.1431–1440, 2011.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials bond formation and performance. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook**: Wood as an Engineering Material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

GAO, Z.; WANG, W.; ZHAO, Z.; GUO, M. Novel Whey Protein-Based Aqueous Polymer-Isocyanate Adhesive for Glulam. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 120, p. 220–225, 2010.

GEORGE, J. A.; ROBINSON, D. F. A heuristic for packing boxes into a container. **Computers & Operations Research**, v. 07, p. 147-156, 1980.

IBÁ. **Indústria Brasileira de Árvores 2017**. Brasília, 2017, 80p.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: abril, 2005.

IWAKIRI, S.; PRATA, G. J. Produção de painéis compensados multilaminados de Eucalypto. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, 8p. 2008. Artigo técnico. Disponível em: <http://www.remade.com.br>. Acesso em: 10 set. 2017.

LUO, N.; QIAN, J.; CUPPS, J.; WANG, Y.; ZHOU, B.; ARMBRUSTER, L.; FRENKEL, P. Natural Oil Polyol of High Reactivity for Rigid Polyurethanes. **Bio Based Technologies®**, 2008.

MARÇAL, C. P. **Estatística do comércio exterior, 2005**. Vitória: Portos do Espírito Santo; 2006.

MARINHO, N. P.; NASCIMENTO, E. M.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; NETO, S. C.; AZEVEDO, E. C. Caracterização Física e Térmica de Compósito de Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona Associado com Partículas de Bambu. **Polimeros**, v. 23, n 2, pp. 201-205, 2013.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalypto. **Revista Tecnológica**, Edição Especial ENTECA 2009, p. 35-45, 2009.

MOODY, R. C.; HERNANDEZ, R. Glued-Laminated Timber. In: _____. **Engineered Wood Products** – A guide for specifiers, designers and users. Madison: USDA Forest Service, 1997. p. 1-39.

PAIVA, H. N.; JACOVINE, L. A. G.; RIBEIRO, G. T.; TRINDA, C. **Cultivo de eucalypto: implantação e manejo**. 1. ed. Viçosa - MG: Aprenda Fácil, 2011. 360 p.

PETRAUSKI, S. M. F. C. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalypto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo de mamona**. 2012, 139 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 1994

PIZZOL, V. D.; NOGUEIRA, M.; LOMBARDI, L. R. Confecção de Calços de *Eucalyptus paniculata* para Transporte de Chapas de Aço. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 223-226, 2011.

PURBOND. **Ficha Técnica dos Adesivos**. Disponível em: <http://www.purbond.com>. Acesso em: 15 set. 2017.

SHMULSKY, R.; P. JONES, P. D. **Forest products and wood science: an introduction**. 6.ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011. 496 p.

SILVEIRA, R. B. **Análise da rentabilidade potencial de investimentos em reflorestamento de eucalypto no leste de Mato Grosso do Sul e Norte do**

Paraná. 2008. 41 f. Tese (Mestrado em Produção e Gestão Industrial). Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 2008.

SINDAMARES. **Portos do Espírito Santo.** Disponível em: <http://www.sindamares.com.br/portos/>. Acesso em: 07 fev. 2019.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 471-480, 2010.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia rubra*).** 2009. 118 f. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-107/2009. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília, D.F., 2009.

TIENNE, D. L. da C.; NASCIMENTO, A. M. do; GARCIA, R. A.; SILVA, D. B. Qualidade de adesão de juntas de madeira de pinus coladas em condições simuladas de serviço interna e externa. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n.1, p.16-29, 2011.

VALVERDE, S. R. **Características do Mercado da Madeira de Reflorestamento no Brasil.** 2008. Texto técnico. Centro de Inteligência em Florestas. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_caracteristicas_brasil_4558.pdf. Acesso em: 17 set. 2017.

WILSON, I. D.; ROACH, P. A.; WARE, J. A. Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study. **Journal Knowledge Based Systems**, vol. 14, p. 137-145, 2001.

YANG, T. H.; WANG, S. Y.; LIN, C. J.; TSAI, M. J. Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 22, p. 487-493, 2008.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada.** São Carlos. 2003. 102 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2003.

ZANGIÁCOMO, A. L.; LAHR, F. A. R. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 9, n. 40, p. 103-131, 2007.

Capítulo I

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos calços de MLC de eucalipto colados com dois adesivos, resorcinol-formaldeído e poliuretano de mamona. Como propriedades físicas das tábuas utilizadas, determinou-se a densidade aparente, o teor de umidade e a retratibilidade. Avaliou-se também as propriedades mecânicas por métodos não-destrutivos como vibração transversal, vibração longitudinal e “stress wave” e por métodos destrutivos como compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, cisalhamento na linha de cola e delaminação. Todos os ensaios destrutivos, exceto delaminação, foram realizados em duas condições de umidade (seco e saturado). A densidade e o teor de umidade se encontraram dentro dos limites ideais para a produção de MLC, que são de $0,40 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$ e 7 a 14 % de umidade. Em todos os ensaios destrutivos a madeira colada com os adesivos submetidos a condição saturada tiveram uma menor resistência. Os adesivos à base de poliuretano e de resorcinol-formaldeído não se diferiram na condição seca, apresentando bom desempenho. Para o percentual de falha na madeira, o adesivo PUR na condição saturada apresentou uma menor porcentagem de falha na madeira, indicando uma baixa resistência na colagem do adesivo nessa condição. No ensaio de delaminação, o adesivo resorcinol apresentou melhor resultado, mas ambos ficaram dentro do estabelecido em norma.

Palavras-chave: poliuretano de mamona, resorcinol-formaldeído, calços.

ABSTRACT

This work aimed to characterize the physical and mechanical properties of the Glulam eucalypt chocks glued with two adhesives, resorcinol-formaldehyde and castor oil-based polyurethane. As the physical properties of the boards used, the apparent

density, the moisture content and the shrinkage were determined. It was also evaluated the mechanical properties by non-destructive methods such as transverse vibration, longitudinal vibration and stress wave and by destructive methods, such as normal fiber compression, parallel fiber compression, parallel shear to fibers, glue line shear and delamination. All destructive tests, except delamination, were performed under two humidity conditions (dry and saturated). The density and moisture content were within the ideal limits for the production of Glulam. In all destructive tests the adhesives submitted to saturated condition had a lower resistance. The adhesives resorcinol-formaldehyde and castor oil-based polyurethane did not differ in the dry condition, presenting good performance. For the percentage of wood failure, the adhesive castor oil-based polyurethane in the saturated condition presented a lower percentage of failure in the wood, indicating a low resistance in the adhesion of the adhesive in that condition. In the delamination test, the resorcinol-formaldehyde adhesive presented the best result, but both were attended standard established.

Keywords: castor polyurethane, resorcinol-formaldehyde, chooks.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material de origem natural e renovável. Apresenta resistência mecânica elevada, boa relação resistência/peso, baixo custo energético para a sua produção, pode ser facilmente trabalhada e manipulada. Devido as suas características é amplamente utilizada na construção civil, em pontes, coberturas, residências, na movelaria, no transporte de cargas, como por exemplo os calços (CALIL NETO, 2014).

Os calços são constituídos de peças de madeira serrada e utilizados como separadores entre chapas de aço nos pátios da usina, portos e embarcações (PIZZOL, 2011). Durante muito tempo empregou-se espécies nativas de alta resistência para sua fabricação, porém a pressão econômica sobre essas espécies fez com que se buscasse outras alternativas.

O Brasil possui uma extensa área de reflorestamento, destacando-se principalmente os plantios de *Eucalyptus* e *Pinus*, tendo este primeiro gênero, espécies de baixa à alta densidade. Assim, viu-se a possibilidade do emprego da madeira de eucalipto na produção dos calços.

Com a maior disponibilidade de madeiras de baixa densidade, o uso da colagem das peças tornou-se uma opção para melhorar as propriedades mecânicas do produto final através do emprego da madeira laminada colada. Elementos de madeira laminada colada são formados a partir da colagem de lâminas de madeira paralelas entre si, com utilização de adesivos e pressão (CALIL NETO, 2011).

Para a obtenção de uma ligação de madeira com qualidade é necessário primeiramente conhecer a madeira e suas características naturais. Para que o produto final também tenha um bom desempenho precisa-se conhecer suas propriedades física e mecânicas (NOGUEIRA, 2017).

Nesse contexto, o objetivo foi avaliar as propriedades físicas da madeira do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *grandis* e as propriedades mecânicas dos calços de MLC.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Estruturas de Madeira no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro/ES.

Para realização da pesquisa foi utilizada a madeira de um híbrido de árvores de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com 11 anos de idade procedente da empresa Bahia Produtos de Madeira, localizada na cidade de Nova Viçosa, no estado da Bahia.

O lote de madeira obtido foi composto por 40 tábuas que foram dispostas em local protegido das intempéries até que atingisse a umidade de equilíbrio com o ambiente. Posteriormente foi feita uma classificação visual e seccionamento das tábuas nas dimensões desejadas para produção dos calços de madeira laminada colada.

2.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira

A caracterização das propriedades físicas das tábuas foi conduzida de acordo com os métodos de ensaios definidos na Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 (ABNT, 1997), para a determinação do teor de umidade (Equação 1), densidade aparente (Equação 2) e estabilidade dimensional (Equações 3 e 4).

Para determinação das propriedades físicas foram retirados quatro corpos de prova de cada tábua, totalizando 160 corpos de prova. Foram utilizados os mesmos corpos de prova para ambos os ensaios, com dimensões de 3 x 2 x 5 cm (espessura x largura x comprimento) que representam as direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente.

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

m_i : massa inicial da madeira, em gramas;

m_s : massa da madeira seca, em gramas.

$$\rho_{ap}(\%) = \frac{m(\%)}{V(\%)} \quad (2)$$

Em que:

$m(\%)$: massa da madeira a um dado teor de umidade, em gramas;

$V(\%)$: volume da madeira a um dado teor de umidade.

$$\varepsilon_{r,12} = \left(\frac{L_{12,sat} - L_{12, sec}}{L_{123, sec}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{i,12} = \left(\frac{L_{12,sat} - L_{12, sec}}{L_{12, sat}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

ε_r : deformações específicas de retração;

ε_i : deformações específicas de inchamento;

L_{sat} : dimensões da madeira saturada;

L_{sec} : dimensões da madeira seca;

L_{12} : direções radial e tangencial.

2.2 Adesivos empregados e confecção dos elementos colados

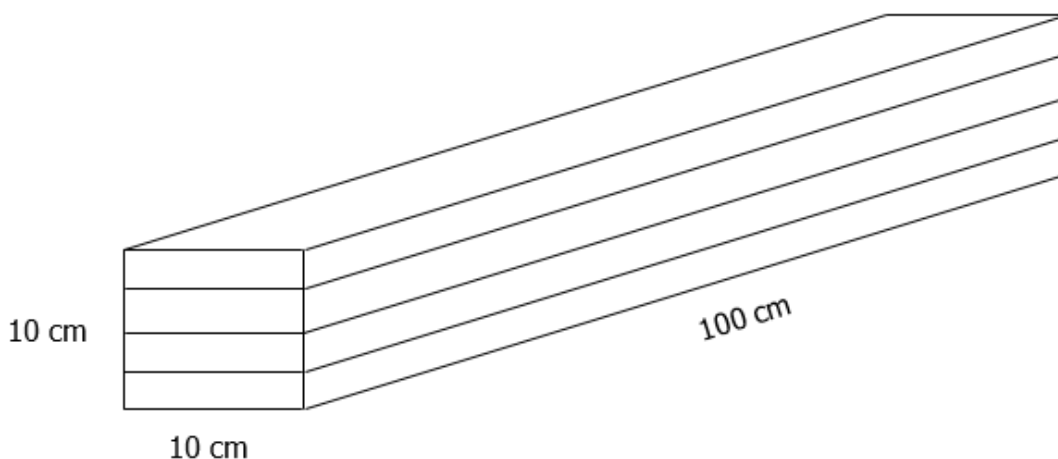
Foram utilizados dois tipos de adesivos comerciais para colagem da madeira, sendo um termofixo¹, o Cascophen RS-216-M, a base de resorcinol-formaldeído (RF) e um termoplástico², o poliuretano bi componente à base de óleo de mamona (PUR).¹

A aplicação dos adesivos, a escolha do extensor e do catalizador foi mediante recomendações dos fabricantes. Para a aplicação do Cascophen RS-216-M foram adicionados 20% de catalisador FM-60-M. Para a aplicação do poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,2, sendo 1 parte do componente A (um pré-polímero) e 1,2 partes do componente B (um poliol).

Para produção dos calços de madeira laminada colada foi feito primeiramente uma classificação das tábuas conforme sua densidade aparente. Dessa forma, realizou-se uma colagem de lâminas com valores de densidade mais próximos.

Após a classificação das densidades, as tábuas foram transformadas em lamelas com dimensões de 2,5 x 10,5 x 105 cm (espessura x largura x comprimento). Para a confecção de cada calço foram unidas 4 peças dispostas com fibras paralelas entre si (Figura 1). No total, 30 calços foram produzidos, sendo 15 utilizando resorcinol-formaldeído (RF) e 15 utilizando poliuretano de mamona (PUR).

Figura 1. Esquema de confecção dos calços de MLC de eucalipto.



Fonte: O autor.

¹ Os adesivos termofixos são convertidos a um estado insolúvel, irreversível, através de reações químicas com ou sem aplicação de calor. ² Os adesivos termoplásticos são adesivos resistentes somente a mudanças físicas, podendo ser modificados pela ação do calor ou solventes (PIZZI e MITTAL, 1994).

As lamelas foram coladas com gramatura igual a 300 g.m^{-2} em linha de cola simples com auxílio de uma espátula, unidas e prensadas em uma prensa com capacidade de 15 ton., durante 48 horas a uma pressão de 1 MPa e temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 65%, de acordo com recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Foram utilizadas duas prensas, sendo que cada uma podia fazer três calços por vez, o que totalizou cinco prensagens de cada adesivo.

Após o término da prensagem, os calços de madeira laminada colada foram dispostos em local coberto e mantidos em equilíbrio higroscópico com o meio, para que se pudesse atingir a cura completa dos adesivos.

Posteriormente os calços foram levados para a marcenaria, onde foram aplainados e deixados com a dimensão final desejada de $10 \times 10 \times 100 \text{ cm}$ (espessura x largura x comprimento).

2.3 Caracterização das propriedades mecânicas da madeira laminada colada

A caracterização das propriedades mecânicas dos calços de MLC foi realizada por meio de ensaios não-destrutivos e ensaios destrutivos. Nos ensaios não-destrutivos utilizou-se todos os calços produzidos, que foram medidos e pesados para realização dos ensaios de vibração transversal, vibração longitudinal e *Stress wave*.

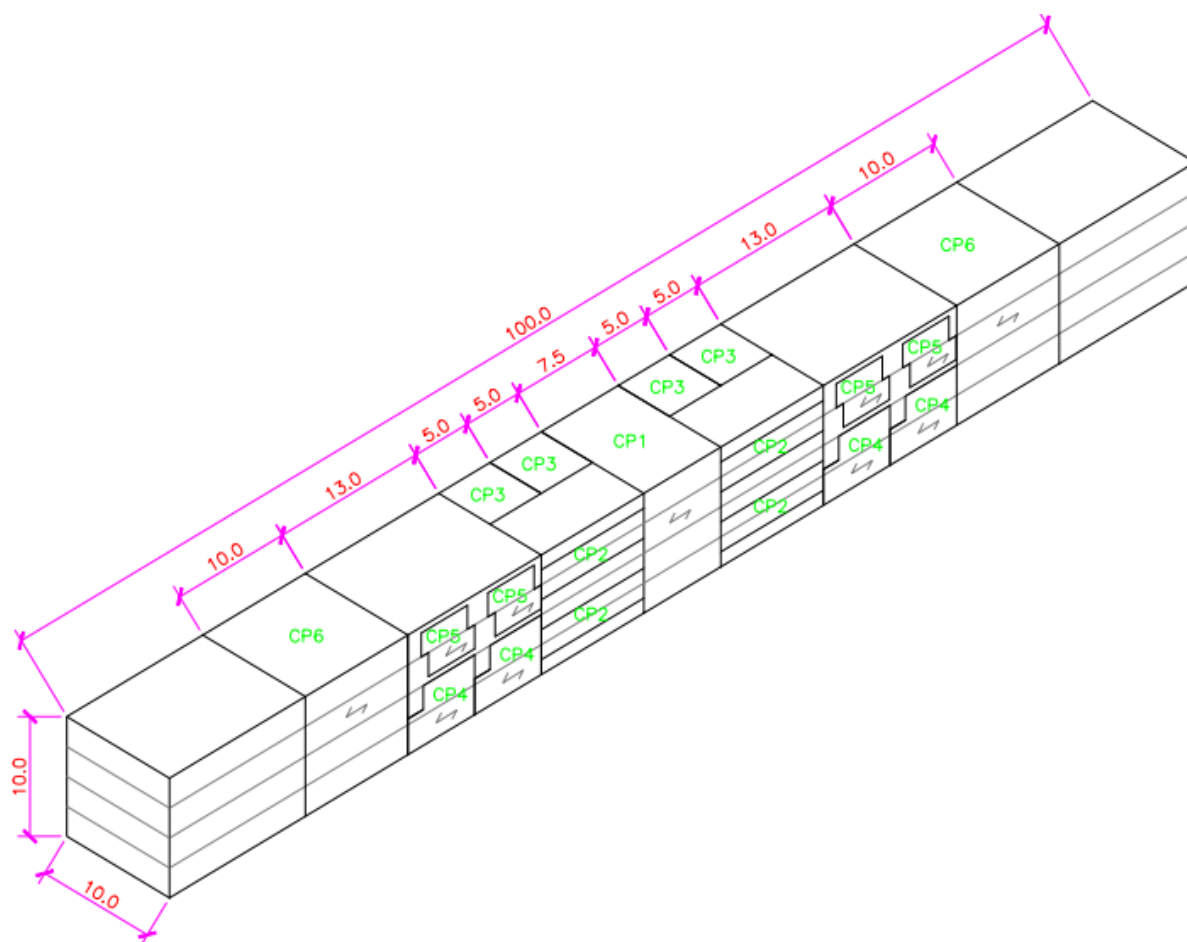
Posteriormente foi selecionado um calço de cada prensagem para cada adesivo, totalizando cinco calços de resorcinol e cinco calços de poliuretano de mamona para os ensaios destrutivos.

Foram então retirados corpos de prova de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, cisalhamento na linha de cola e delaminação.

Os ensaios foram realizados em duas condições de umidade: condição seca, em que os corpos de prova foram mantidos com teor de umidade em equilíbrio com o ambiente; e na condição saturada, em que os corpos de prova foram imersos em água por um período mínimo de duas semanas com o objetivo de elevar o teor de umidade da madeira para acima do ponto saturação das fibras ($U > \text{PSF}$).

Os corpos de prova foram retirados ao longo do comprimento dos calços conforme mostra a Figura 2.

Figura 2. Esquema de retirada dos corpos de prova dos calços de MLC (valores em cm).



*CP 1: delaminação; CP 2: compressão paralela; CP 3: compressão normal; CP 4: cisalhamento na madeira; CP 5: cisalhamento na linha de cola; CP 6: compressão estrutural.
Fonte: O autor.

2.3.1 Ensaio de vibração transversal livre

O ensaio de vibração transversal livre foi realizado conforme instruções das normas ASTM E1876 (ASTM, 2007) e ASTM C215 (ASTM, 2008). Para a realização do experimento foi utilizado um microfone para captar a vibração devido à aplicação de um impacto, um suporte para o corpo de prova e o computador com um programa para capturar a frequência natural. Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal ($E_{a,vt}$) através da Equação 5, devido a vibração transversal livre tomou-se à primeira frequência de ressonância de vibração transversal.

$$E_{a,vt} = \frac{f_r^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que:

$E_{a,vt}$ = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

f_r = frequência de vibração transversal (Hz);

W = peso da peça de madeira (N);

L = distância entre apoios (m);

I = momento de inércia da seção transversal (m⁴);

g = aceleração da gravidade (9,80665 m.s⁻²).

2.3.2 Ensaio de vibração longitudinal

O ensaio de vibração longitudinal foi realizado conforme instruções da norma ASTM E1876 (ASTM, 2007), no qual a direção do movimento da onda ocorre na mesma direção do modo de vibração longitudinal. O ensaio de vibração longitudinal foi realizado de forma semelhante ao de vibração transversal, mas com sentido do impacto e captação do som na direção longitudinal. No ensaio de vibração longitudinal obtém-se uma resposta acústica composta por uma ou mais frequências naturais de vibração longitudinal (DIÓGENES et al., 2011). Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal ($E_{a,l}$) por meio da Equação 6, devido a frequência longitudinal tomou-se à primeira frequência de ressonância de vibração longitudinal.

$$E_{a,l} = 4 \cdot \left(\frac{m \cdot f_1^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{l}{h} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

$E_{a,l}$ = Módulo de elasticidade dinâmico pelo método de vib. long. (MPa);

m = Massa (kg);

f_1 = Frequência de vibração longitudinal (Hz);

b = Largura (mm);

h = Altura (mm);

l = Comprimento (mm).

2.3.3 Ensaio de “stress wave”

Para a realização deste ensaio foi empregado o equipamento *FAKOPP Microsecond Timer* da empresa FAKOPP Ent., projetado para medir o tempo de propagação de ondas de tensão. O sinal foi gerado por um martelo no sensor de partida e a unidade exibe o tempo de propagação medido. O equipamento conta com um martelo de impacto e uma caixa de temporizador de microssegundo, que foi acoplado aos calços com auxílio de dois sensores.

Após acoplar os transdutores em cada uma das extremidades da viga de madeira, foi executada a pancada no sensor de início, de forma a transmitir a onda no sentido longitudinal.

Para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico por este método foi empregada a Equação 7.

$$E_{s,w} = v^2 \cdot \frac{\rho}{g} \cdot 10^{-5} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

$E_{s,w}$ = Módulo de elasticidade dinâmico pelo “Stress Wave Timer” (MPa);

v = Velocidade da onda na madeira (m.s^{-1});

ρ = Densidade do corpo de prova (kg.m^{-3});

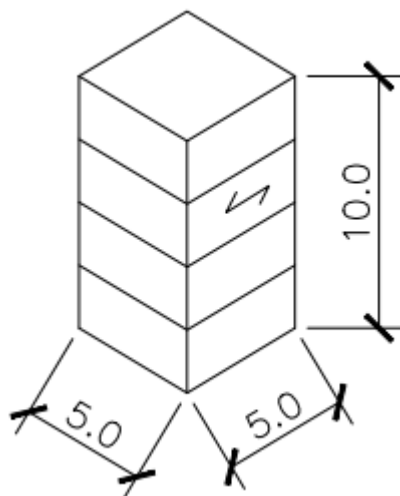
g = Aceleração da gravidade (m.s^{-2}).

2.3.4 Ensaio de compressão normal às fibras

Para o ensaio de compressão normal às fibras dos corpos de prova foi utilizada a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). A partir deste ensaio determinou-se o módulo de elasticidade na direção normal às fibras e a resistência à compressão normal às fibras.

As dimensões dos corpos de prova de compressão normal às fibras, obtido a partir dos calços de MLC, para a realização dos ensaios secos e saturados, são demonstrados na Figura 3.

Figura 3. Representação do corpo de prova de compressão normal às fibras (valores em cm).



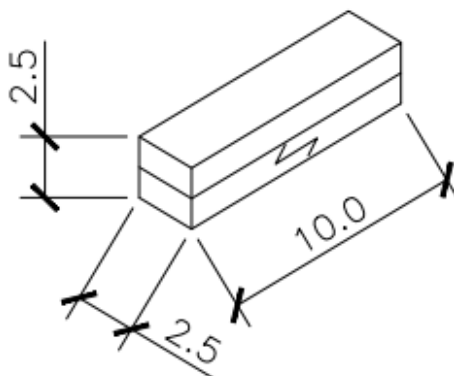
Fonte: O autor.

2.3.5 Ensaio de compressão paralela às fibras

Para o ensaio de compressão paralela às fibras, foram aplicados os métodos de ensaio da norma ASTM D143 (ASTM, 2000). A partir deste ensaio determinou-se o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras.

As dimensões dos corpos de prova de compressão paralela às fibras, obtido a partir dos calços de MLC, para a realização dos ensaios secos e saturados, são demonstrados na Figura 4.

Figura 4. Representação do corpo de prova de compressão paralela às fibras (valores em cm).



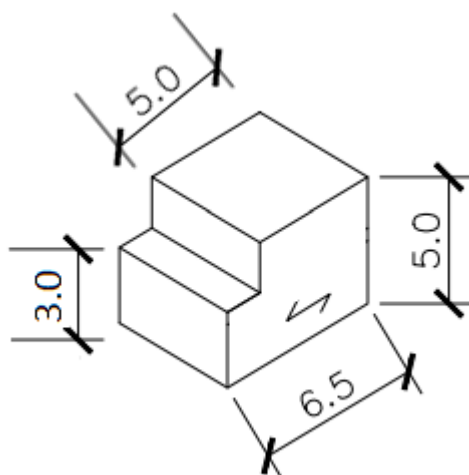
Fonte: O autor.

2.3.6 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

No ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, utilizou-se os métodos de ensaio da norma ASTM D143 (ASTM, 2000) para determinação da resistência.

Na Figura 5 estão apresentadas as dimensões e as configurações para os corpos de prova confeccionados.

Figura 5. Representação do corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras (valores em cm).



Fonte: O autor.

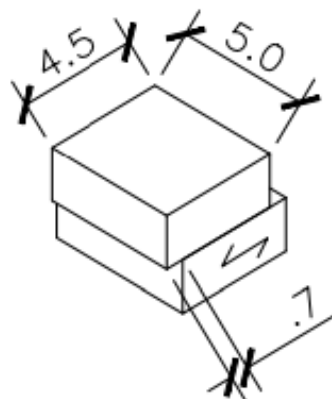
2.3.7 Ensaio de cisalhamento na linha de cola

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola, o procedimento de teste foi realizado de acordo com a norma ASTM D 905 – *Standard Test for Strenght Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading* (ASTM, 2009).

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola foi quantificado a percentagem de falhas na madeira com o auxílio de uma lâmina quadriculada transparente, com precisão de 1% (38,1 x 50,8 mm). As avaliações da percentagem de falhas na madeira foram realizadas conforme a norma ASTM D 905 (ASTM, 2009).

Na Figura 6 estão apresentadas as dimensões dos corpos de prova usados neste ensaio.

Figura 6. Representação do corpo de prova de cisalhamento na linha de cola (valores em cm).



Fonte: O autor.

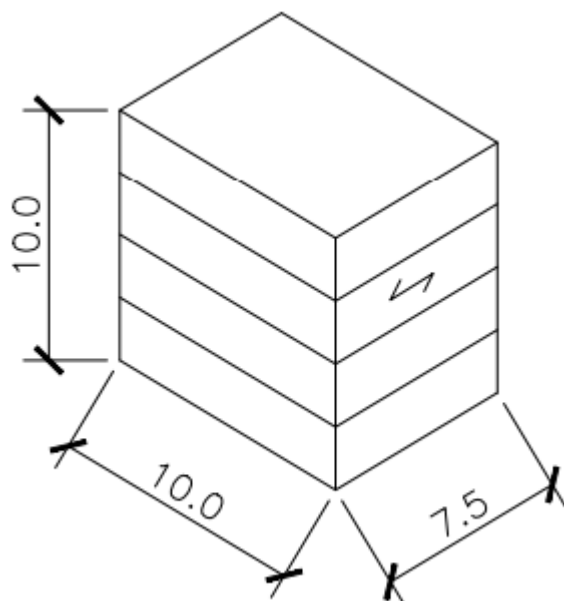
2.3.8 Ensaio de delaminação

O ensaio de delaminação foi realizado conforme as recomendações da norma AITC T110, da *American Institute of Timber Construction* - AITC (2007). O ensaio consistiu em colocar os corpos de prova dentro de uma autoclave (Figura 7), expondo as linhas de cola a tensões devido ao efeito de vácuo e pressão, em três ciclos de umedecimento e secagem.

Na primeira etapa do ensaio, os corpos de prova foram inseridos na autoclave para aplicação de vácuo de 75 ± 10 kPa, durante 2 horas, depois liberou-se o vácuo e aplicou-se água com pressão de 540 ± 20 kPa durante 2 horas. Este mesmo procedimento foi repetido na segunda etapa, totalizando 8 horas de permanência na autoclave e, então, os corpos de prova foram retirados da autoclave e colocados para secar ao ar livre, no primeiro ciclo. No segundo e terceiro ciclos foram repetidos os mesmos procedimentos do primeiro ciclo. Ao final do ensaio, avaliou-se o comportamento da madeira colada exposta ao exterior, por meio da porcentagem de delaminação, que foi obtida nas duas faces de topo dos corpos de prova.

Figura 7. a) Representação do corpo de prova de delaminação (valores em cm). b) Autoclave utilizada.

a



Fonte: O autor.

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando o delineamento inteiramente casualizado. Os dados das variáveis descritas em material e métodos foram submetidos ao teste de normalidade (SHAPIRO; WILK, 1965) e de homogeneidade de variâncias F máximo (HARTLEY, 1950). Para comparação das médias foram utilizados o teste de Tukey (mais de duas médias) e o teste F nos casos em que houve somente dois tratamentos a serem comparados. O nível de significância adotado foi de 5% de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físicas da madeira

Os valores médios das tábuas de madeira de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* obtidos nos ensaios de densidade aparente, teor de umidade e estabilidade dimensional estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios para a densidade aparente, teor de umidade, retração e inchamento tangencial e radial para a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Densidade (g.cm ⁻³)		Teor de umidade (%)	
0,595 (0,107)		9,344 (0,551)	
Estabilidade dimensional			
Retração		Inchamento	
Tangencial	Radial	Tangencial	Radial
7,897 (1,508)	4,492 (1,074)	8,604 (1,803)	4,717 (1,198)
Fator anisotrópico (T/R)			
1,815 (0,392)			

*T = Tangencial; R = Radial; valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: O autor.

A densidade aparente da madeira variou de baixa a média, resultando numa média de 0,595 g.cm⁻³. Segundo Gonzalez et al., (2014) a densidade aparente da madeira no gênero *Eucalyptus* varia entre 0,40 e 1,20 g.cm⁻³, podendo ser classificada como leve, média e pesada, de acordo com o valor obtido. Para a produção de MLC, a madeira deve ter densidade entre 0,400 g.cm⁻³ e 0,750 g.cm⁻³, demonstrando ser essa madeira ideal para confecção dos calços (MIOTTO; DIAS, 2009).

O teor de umidade médio encontrado foi de 9,344%, valor que também está dentro da faixa ideal, que segundo Miotto e Dias (2009) varia de 7% a 14% de umidade, em função do adesivo utilizado.

O conhecimento da densidade bem como o teor de umidade são fatores indispensáveis para fabricação de elementos de madeira laminada colada, uma vez que a umidade e a densidade aparente influenciam no tempo de prensagem, na

pressão aplicada e na penetração e cura do adesivo, durante o processo de produção (SEGUNDINHO et al., 2015).

De acordo com a Tabela 1 é possível verificar que as alterações dimensionais foram aproximadamente o dobro no sentido tangencial, tanto para retração quanto para o inchamento. Freitas et al. (2016) estudando a estabilidade dimensional de clones de eucalipto, encontraram uma retração tangencial de 9,13%, uma retração radial 5,67% e um fator anisotrópico igual a 1,78 para *E. grandis* x *E. urophylla*.

Por ser um material higroscópico, a madeira é capaz de absorver ou perder água para o meio em que se encontra e essa contração ou inchamento ocorrem de forma desigual nos diferentes planos anatômicos da madeira. De forma geral, a alteração volumétrica ocorre em maiores proporções no sentido tangencial aos anéis de crescimento, seguida pelo sentido radial, e quase desprezível no sentido paralelo à grã (SILVA; OLIVEIRA, 2003). Essa diferença entre contração e inchamento da madeira, nos seus três sentidos anatômicos, deve-se às estruturas microscópicas e submicroscópicas da parede celular (GOMES et al., 2006).

A retratibilidade volumétrica expressa a variação total ocorrida na variação higroscópica, no entanto, as variações lineares que ocorrem ao longo dos planos de orientação da madeira são na maioria das vezes mais importantes, pois são diferentes e tornam a madeira um material anisotrópico. Principalmente em se tratando da variação dimensional na direção transversal (radial e tangencial), em que há desequilíbrio entre os valores da retratibilidade. Tal desbalanceamento entre as contrações é chamado de fator anisotrópico ou coeficiente de anisotropia, sendo a relação entre a razão da retratibilidade na direção tangencial pela retratibilidade na direção radial (OLIVEIRA et al., 2010).

Na Tabela 1 pode-se observar o valor médio do fator anisotrópico das tábuas (1,815). Esse coeficiente representa o comportamento da madeira durante a secagem, indicando maior ou menor propensão as peças a fendilharem ou empenarem. Os valores variam de 1,3 a 1,4 para madeiras muito estáveis, e superiores a 3 para madeiras muito instáveis dimensionalmente, como madeiras de muitas espécies do gênero *Eucalyptus* (OLIVEIRA et al., 2010). Quanto mais próximo da unidade for o coeficiente de anisotropia, mais estável dimensionalmente será uma madeira, e por consequência, menores empenamentos e rachaduras a mesma estará sujeita a desenvolver (FREITAS et al., 2016).

3.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira laminada colada

3.2.1 Ensaios não destrutivos

Os valores médios dos módulos de elasticidade dos calços de MLC de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*, obtidos pelos ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal e *Stress wave* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios dos módulos de elasticidade obtidos por ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal *Stress wave* na madeira laminada colada.

Adesivo	MOE		
	VL (GPa)	VT (GPa)	SW (GPa)
PUR	14,60 (1,79) Aa	11,30 (1,59) Ab	12,04 (1,45) Ab
RF	14,42 (1,23) Aa	11,39 (1,06) Ab	11,63 (1,10) Ab

*RF: Adesivo Resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona; VL: Vibração longitudinal; VT: Vibração transversal; SW: *Stress wave*. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: O autor.

Considerando o adesivo poliuretano, o maior módulo de elasticidade foi obtido no ensaio de vibração longitudinal. Os módulos obtidos na vibração transversal e *Stress wave* não se diferiram estatisticamente. O mesmo ocorreu com o adesivo resorcinol-formaldeído. Os adesivos utilizados não apresentaram diferenças estatísticas entre si para todos os três ensaios realizados

A técnica de vibração longitudinal de barras de seção transversal quadrada ou circular é considerada por diversos autores entre os métodos dinâmicos como o de maior precisão na determinação do módulo de elasticidade ou módulo de Young e foi um dos primeiros métodos não destrutivo desenvolvido para a determinação do módulo de elasticidade da madeira (CANDIAN, 2007).

De acordo com Ballarin, Targa e Palma (2002) a técnica de vibração transversal é considerada um teste confiável para apresentar o módulo de elasticidade, sobretudo pela grande aderência do modelo físico do fenômeno e seu correspondente modelo

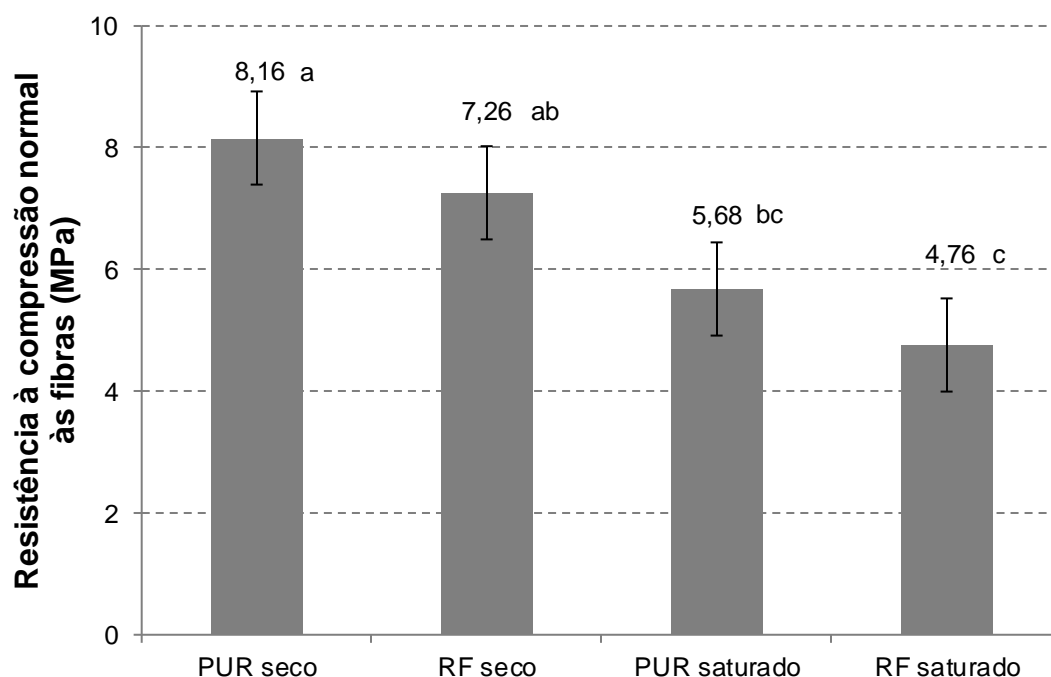
teórico matemático. Esse módulo pode ser correlacionado ao módulo de flexão estática.

A avaliação das propriedades de resistência da madeira por meio do ensaio de Stress wave tem relação direta com a velocidade de propagação da onda e a densidade da madeira, uma vez que quanto maior a velocidade de propagação da onda, maior será o módulo de elasticidade (CUNHA; MATOS, 2010).

3.2.2 Compressão normal às fibras

Os resultados obtidos para compressão normal às fibras nos corpos de prova dos calços de MLC na condição seca e saturada podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 – Valores médios de resistência à compressão normal às fibras.



* Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Sendo RF: Adesivo Resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O autor.

A maior média de resistência à compressão normal às fibras foi obtida pelos corpos de prova colados com poliuretano e ensaiados na condição seca (8,16 MPa), esse valor foi 11,03% maior que o encontrado para o resorcinol formaldeído na mesma condição de umidade (7,26 MPa). A menor média pertence aos corpos de prova

colados com resorcinol formaldeído na condição saturada (4,76 MPa), esse valor foi 16,19% menor que o poliuretano na mesma condição.

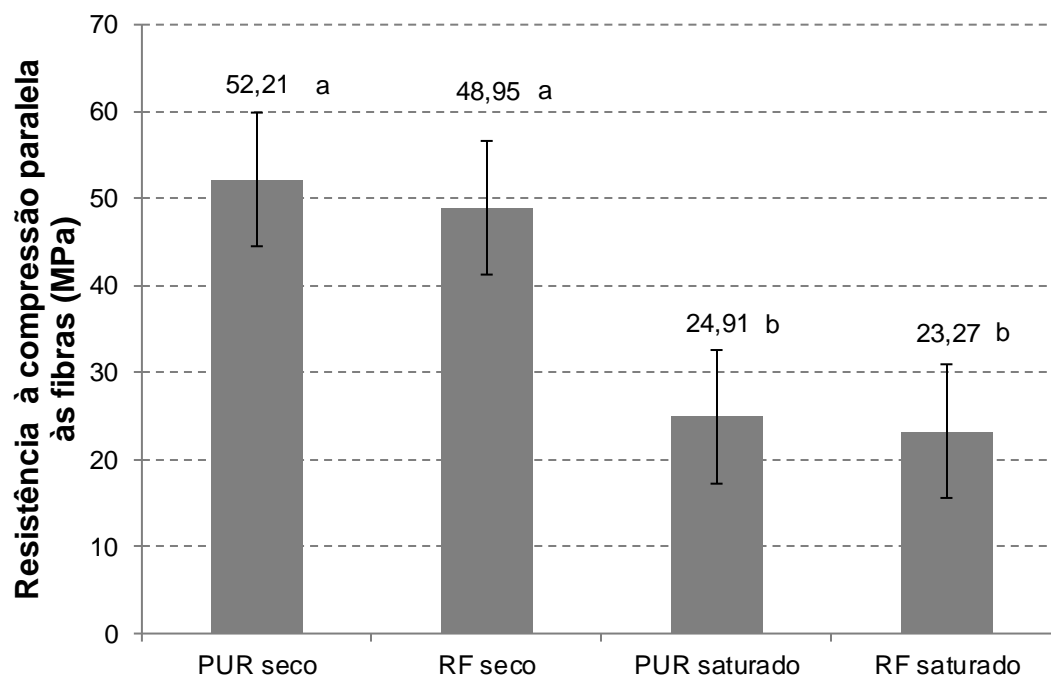
Os valores obtidos foram inferiores aos encontrados por Segundinho et al., (2018) que em seu estudo de caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. obtiveram um valor médio de 10,61 MPa para as madeiras coladas com poliuretano na condição seca e 6,71 MPa na condição saturada, para as madeiras coladas com resorcinol-fenol-formaldeído na condição seca a média da resistência à compressão normal às fibras foi de 8,68 MPa e para a condição saturada 6,28 MPa.

Ao analisar a figura 8, é possível perceber que os corpos de prova ensaiados na condição seca obtiveram uma maior resistência à compressão normal às fibras. Isso se deve a variação da resistência da madeira em função do teor de umidade, uma vez que com o aumento do teor de umidade da madeira observa-se uma diminuição em sua resistência mecânica, cuja variação é mais sensível para baixos teores de umidade, e é praticamente desprezível para elevados teores de umidade (LOGSDON, 1998).

3.2.2 Compressão paralela às fibras

Os resultados obtidos para compressão paralela às fibras nos corpos de prova dos calços de MLC na condição seca e saturada podem ser observados na Figura 9.

Figura 9. Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras.



* Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Sendo RF: Adesivo Resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O autor.

Os corpos de prova colados com poliuretano de mamona e ensaiados na condição seca foram os que apresentaram maior média de resistência à compressão paralela às fibras (52,21 MPa), sendo 6,24 % maior que a média apresentada pelos corpos de prova de resorcinol formaldeído na mesma condição (48,95 MPa), porém esses valores não se diferiram estatisticamente. A menor média foi obtida pelo resorcinol formaldeído na condição saturada (23,27 MPa), valor esse, 6,53% menor que para o adesivo poliuretano na mesma condição, mas que não apresentou diferença significativa pelo teste de Tukey.

Os valores de resistência à compressão paralela às fibras obtidos neste estudo foram semelhantes ao encontrados por Segundinho et al. (2018), onde os corpos de prova de MLC colados com poliuretano na condição seca tiveram uma resistência de 50,90 MPa e os na condição saturada 30,98 MPa. Já para resorcinol-fenol-formaldeído seco e saturado, a resistência foi de 48,15 MPa e 27,98 MPa, respectivamente.

Fonte (2004) em seu estudo sobre pontes protendidas de *Eucalyptus citriodora* obteve o valor médio de 57,8 MPa para resistência a compressão paralela às fibras e Prim e Piovesan (2011) que estudando as propriedades de duas espécies de

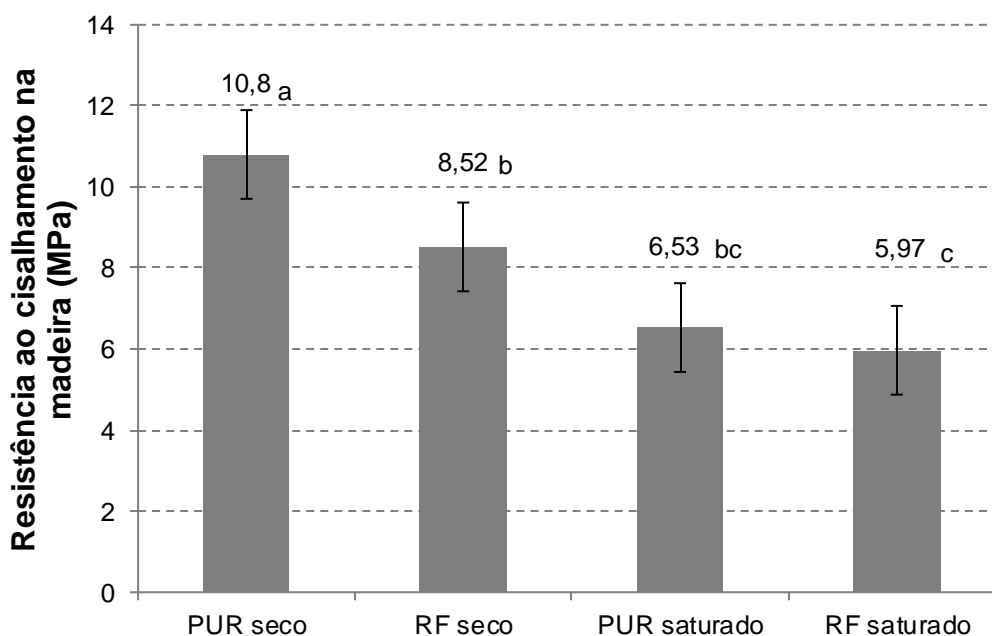
madeiras utilizadas na construção civil obtiveram o valor de 33,1 MPa para a espécie de *Eucalyptus grandis* quando submetida a esta solicitação de esforço.

Da mesma forma que para a compressão normal, a maior resistência à compressão paralela às fibras resulto do ensaio das madeiras na condição seca, o que demonstra que a resistência aumenta com a diminuição da umidade.

3.2.3 Cisalhamento paralelo às fibras da madeira

Os resultados obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova dos calços de MLC secos e saturados são expostos na Figura 10.

Figura 10 - Valores médios de resistências ao cisalhamento na madeira.



* Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Sendo RF: Adesivo Resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O autor.

Novamente, os corpos de prova colados com poliuretano de mamona obtiveram a maior média de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira (10,8 MPa), esse valor foi 21,11% maior que para a madeira colada com resorcinol formaldeído na mesma condição (8,52 MPa).

Os corpos de prova colados com resorcinol formaldeído e ensaiados na condição saturada (5,97 MPa) apresentaram o pior desempenho para a resistência ao

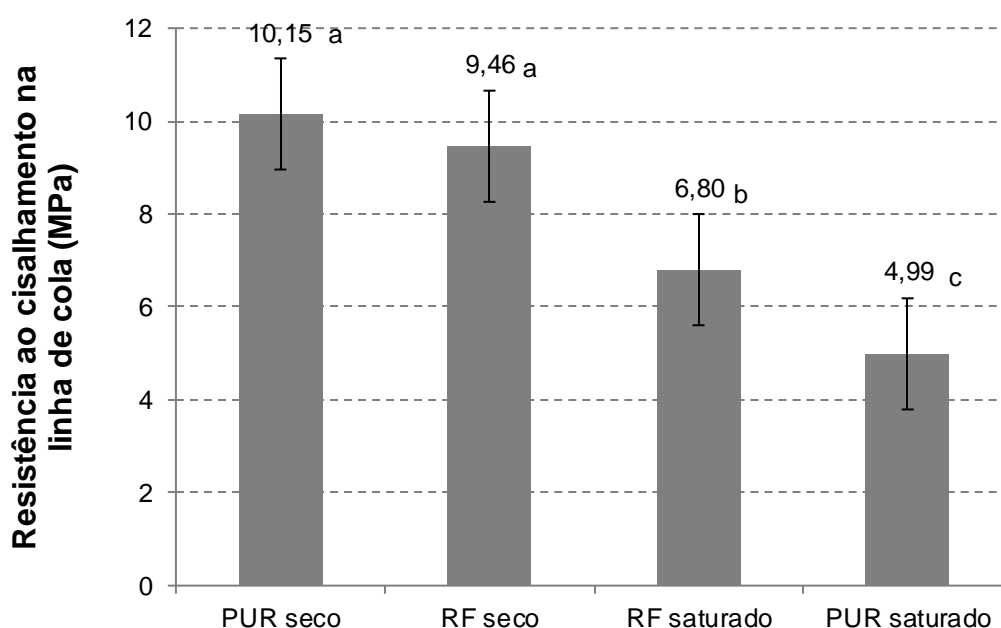
cisalhamento na madeira, no entanto não se diferiu estatisticamente dos ensaios dos corpos de prova de poliuretano na mesma condição (6,53 MPa).

Plaster et al. (2008) estudando o comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. encontraram para esta solicitação de esforço o valor de 11,17 MPa, enquanto Segundinho et al. (2017) ao avaliarem a eficiência da colagem da madeira de *Eucalyptus cloeziana* para a produção de MLC, encontraram uma resistência de 12,05 MPa.

3.2.4 Cisalhamento na linha de cola

Na Figura 11 estão descritos os resultados para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola dos corpos de prova de MLC de eucalipto.

Figura 11 - Valores médios de resistências ao cisalhamento na linha de cola.



* Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Sendo RF: Adesivo Resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O autor.

Da mesma forma que nos demais ensaios, a maior média de resistência ao cisalhamento na linha de cola correspondeu aos corpos de prova colados com poliuretano na condição seca (10,15 MPa) que foi 6,79% superior aos colados com resorcinol formaldeído na mesma condição (9,46 MPa), porém não houve diferença

estatística entre eles. Já a menor média é atribuída aos corpos de prova de poliuretano saturados (4,99 MPa).

Resultados semelhantes foram encontrados por Segundinho et al. (2018) que obtiveram resistência igual a 12,68 MPa para poliuretano na condição seca e 5,99 MPa na condição saturada. Já para o adesivo resorcinol-fenol-formaldeído a resistência foi 10,40 MPa e 8,96 MPa, seco e saturado, respectivamente.

Bianche et al. (2017) avaliando o cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. utilizando adesivo de mamona, encontraram 7,72 MPa para a madeira seca e 5,23 MPa para a madeira úmida. Para o adesivo à base de resorcinol a resistência foi de 7,09 MPa (condição seca) e 6,68 MPa (condição úmida).

Na tabela 3 são apresentados os valores médios percentuais para falha na madeira para os calços de MLC de eucalipto.

Tabela 3 – Média para o percentual de falha na madeira.

Tratamentos	Condição seca	Condição saturada
	Falha na madeira (%)	Falha na madeira (%)
PUR	96,30 a	17,10 b
RF	93,30 a	86,60 a

* Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

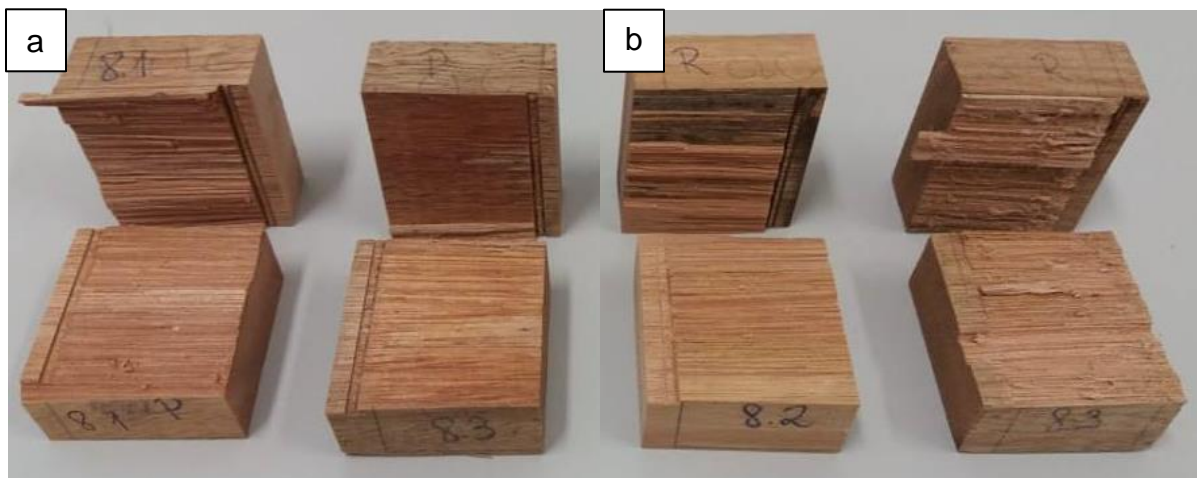
Fonte: O autor.

Apenas o adesivo PUR na condição saturada apresentou diferença estatística, apresentando uma baixa porcentagem de falha na madeira. Isso indica uma baixa resistência na colagem do adesivo nessa condição. Altos valores para o percentual de falha na madeira são indicativos de boa qualidade na adesão, pois demonstram que a coesão do adesivo e a resistência da interface adesivo-madeira são mais altas que a resistência da própria madeira (ASTM, 2000).

Por ser um adesivo semiestrutural, o poliuretano de mamona possui limitação para uso externo. Tendo uma menor resistência à água em relação aos estruturais.

As rupturas nos corpos de prova dos dois adesivos são apresentadas na Figura 12.

Figura 12. Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola. a) Adesivo poliuretano na condição seca e saturada; b) Adesivo resorcinol-formaldeído na condição seca e saturada.



Fonte: O autor.

O adesivo poliuretano de mamona (Figura 12a) apresentou o maior percentual de falha na madeira, no entanto esse valor não se diferenciou estatisticamente do adesivo resorcinol na condição seca e saturada (Figura 12b), o que significa que esses adesivos tem uma boa resistência na linha de cola.

Esse fato pode ser atribuído à composição química desses adesivos. O adesivo de resorcinol deriva de reações de condensação entre o resorcinol e o formaldeído, produzindo não só ligações de elevada resistência mecânica mas também resistentes à água e às variações climáticas (PIZZI, 1994). Já a resistência do adesivo de mamona na linha de cola é atribuída aos monômeros uretanos produzidos pela reação de compostos hidroxilados com isocianatos. Além dos grupos uretanos, os poliuretanos podem ter hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, grupos éster e éter, uréia, amida, entre outros (AZEVEDO, 2009). As ligações cruzadas formadas são importantes na pós-cura do poliuretano, pois aumentam a resistência do polímero (BIANCHE et al., 2017).

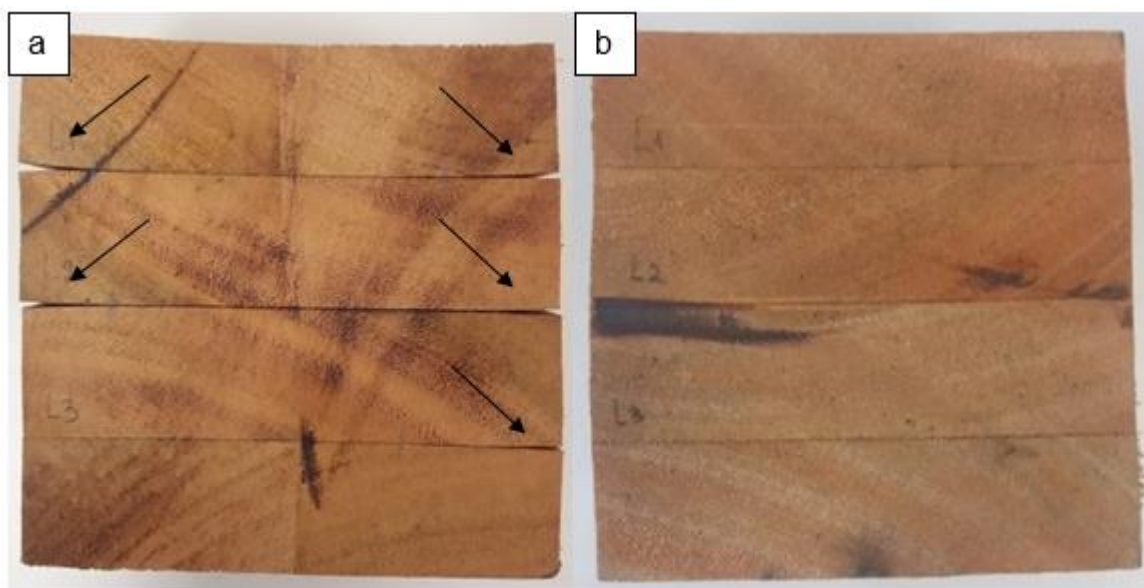
Na condição saturada o adesivo poliuretano de mamona apresentou desempenho muito inferior quando submetido ao ensaio de cisalhamento na linha de cola. As resinas poliuretanas caracterizam-se pela alta resistência à umidade, porém foram encontrados valores inferiores a 20% de falha na madeira neste estudo. O que pode ser explicado pela alta viscosidade do adesivo, o que dificulta seu espalhamento pela madeira e compromete a ligação adesiva (BIANCHE et al., 2017).

Além disso, os adesivos poliuretanos bicomponentes possuem cura rápida na temperatura ambiente, podendo apresentar cura incompleta se os dois componentes não forem misturados adequadamente (VILAR, 2004; FRIHART, 2005).

3.2.5 Delaminação

O valor médio da delaminação nos corpos de prova colado com poliuretano foi igual a 7,92%, enquanto para os colados com resorcinol-formaldeído foi igual a 0,29%. Na Figura 13 é possível observar como ficaram os corpos de prova após o ensaio.

Figura 13. Corpos de prova após o ensaio de delaminação a) Colados com PUR; b) Colados com RF.



Fonte: O autor.

Pode-se perceber que o corpo de prova colado com adesivo poliuretano de mamona apresentou descolamento nas extremidades das linhas de cola, o que não ocorreu nos corpos de prova colados com resorcinol formaldeído.

Os valores médios obtidos neste estudo estão dentro da norma European Standard EN 386 (2001), que estipula valor máximo de 10% para delaminação. E foram inferiores aos encontrados por Segundinho et al. (2018), onde a delaminação para PUR foi igual a 34,40%, enquanto para os colados com RFF foi igual a 5,02%.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados nesse trabalho, pode-se concluir que:

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos indicam a possibilidade de utilização dos adesivos PUR e RF, principalmente na condição seca, para a fabricação de calços de MLC de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*;

O adesivo poliuretano (PUR) de mamona na condição saturada não possui bom desempenho de colagem, uma vez que apresentou a menor porcentagem de falha na madeira;

A madeira do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* apresentou propriedades físicas que permitem sua utilização na confecção de elementos de MLC.

5. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **T110**: Test Methods for Structural Glued Laminated Timber. Colorado, 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM E1876 – 07**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Philadelphia, PA. 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM C215 – 08**: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Philadelphia, PA. 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 143**: Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, PA, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Philadelphia, PA, 2009.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5266**: Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints. Philadelphia, PA, 1999.

AZEVEDO, E. C. O. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2009. 134 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BALLARIN, A. W.; TARGA, L. A.; PALMA, H. A. L. Ensaios não-destrutivos de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia, mg. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; LUCIA, R. M. D. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, 2017.

CANDIAN, M. **Estudo da classificação não destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas**. 2007. 51 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("stress wave timer"). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n. 2, p. 345-354, 2010.

DIÓGENES, H. J. F.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A.H.A.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A.L.H.C. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Ibracon**, v. 2, n. 5, p. 792-813, 2011.

EUROPEAN STANDARD (**EN 386**): glued laminated timber: performance requirements and minimum production requirements. Brussels, 2001.

FONTE, T. F. **Pontes protendidas de eucalipto citriodora**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

FREITAS, D. L. et al. Estabilidade dimensional da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. **Sci. Agrar. Parana.**, Marechal Cândido Rondon, v. 15, n. 4, p. 435-439, 2016.

FRIHART, C. R. **Wood adhesion and adhesives: handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Prews; 2005.

GONÇALEZ, J. C. et al. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998.

OLIVEIRA, J. T. S.; FILHO, M. T.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

PLASTER, O. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; ABRAHÃO, C. P.; BRAZ, R. L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008.

PRIM, J. A.; PIOVESAN, A. Z. Estudo sobre as propriedades de duas espécies de madeiras utilizadas na construção civil. **Unoesce Ciência**, Jaoçaba, v. 2, n. 1, p. 77-86, 2011.

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. e11808, 2017.

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.

VILAR, W. D. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.

Capítulo II

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM CALÇOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA A PARTIR DE RESÍDUOS DE EUCALIPTO

RESUMO

O objetivo deste estudo foi confeccionar e avaliar as propriedades físicas e mecânicas de calços produzidos com resíduos de madeira de eucalipto e colados com adesivo poliuretano de mamona. A caracterização das propriedades físicas da madeira foi feita por meio da determinação da densidade aparente, teor de umidade e retratibilidade. Para caracterização das propriedades mecânicas, realizou-se ensaios não destrutivos de vibração transversal, vibração longitudinal e “stress wave”. E ensaios destrutivos de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e cisalhamento na linha de cola realizados na condição seca e saturada, e delaminação. As propriedades físicas tiveram bons resultados, estando dentro do indicado para confecção de MLC. A partir dos resultados dos ensaios mecânicos destrutivos pode-se perceber uma redução na resistência do adesivo quando submetido aos ensaios na condição saturada, tal redução foi confirmada no ensaio de delaminação, onde apresentou uma porcentagem elevada de descolamento das peças coladas. O adesivo poliuretano de mamona apresenta resultados promissores desde que não seja solicitado seu uso em ambientes saturados de água. O ensaio de delaminação não comprovou uma boa resistência das linhas de cola do adesivo poliuretano de mamona (PUR) empregado.

Palavras-chave: colagem, adesivo de mamona, eucalipto

ABSTRACT

This work aimed to make and to evaluate the physical and mechanical properties of chocks produced with eucalyptus wood residues and glued with castor oil-based polyurethane adhesive. The characterization of the physical properties of the wood were made through determination of the apparent density, moisture content and shrinkage. To characterize the mechanical properties, non-destructive tests of

transverse vibration, longitudinal vibration and stress wave were performed. Destructive tests of normal fiber compression, parallel compression to the fibers, parallel shear to the fibers and shear in the glue line performed in the dry and saturated condition, and delamination. The physical properties had good results, being within the indicated for making Glulam. From the results of the destructive mechanical tests it is possible to notice a reduction in the resistance of the adhesive when subjected to tests in saturated condition. This was confirmed in the delamination test, where it presented a high percentage of detachment of the glued pieces. The castor oil-based polyurethane adhesive presents promising results as long as it is not required to be used in water saturated environments. The delamination test did not prove a good resistance of the glue lines of the castor oil-based polyurethane (PUR) adhesive employed.

Keywords: collage, castor adhesive, eucalyptus

1. INTRODUÇÃO

Os calços utilizados em portos como separadores de chapas de aço e perfis metálicos têm dimensão de 10 cm x 10 cm x 100 cm (largura x altura x comprimento), sendo necessário o uso de peças de maior tamanho para sua confecção. A dificuldade em se obter madeira com alta resistência e com maiores dimensões tem sido fator limitante na produção. Como alternativa tem-se o uso de espécies de reflorestamento, que tem maior disponibilidade, aliada a técnica da colagem de madeira.

As florestas plantadas são uma forma de reduzir a pressão sobre as matas nativas e apresentam diversas vantagens como rápido crescimento, alta produtividade, grande capacidade de adaptação ao local e tem seus ciclos já definidos, de plantio, manutenção e colheita. O Brasil com sua extensa área, maior disponibilidade de água e clima favorável apresenta grande potencial para se plantar florestas. A utilização de madeiras provenientes de reflorestamento contribui para a manutenção das florestas naturais, contentando interesses econômicos, sociais e relacionados a sustentabilidade (LIMA, 2016).

Comercialmente ainda existem limitações relacionadas a dimensão das peças de madeira, necessitando assim da colagem dos elementos (CALIL NETO, 2014). O

aproveitamento de peças de variados tamanhos, que se tornariam resíduos, contribui para a racionalização do uso dos recursos florestais.

Uma das técnicas já utilizadas para esse fim é da madeira laminada colada. A MLC é um produto de madeira projetado, composto de lâminas de madeira individuais coladas com adesivos estruturais (SEGUNDINHO et al., 2015). Esta técnica aperfeiçoa o uso de um recurso renovável utilizando plantios florestais comerciais com maior aproveitamento da madeira, eliminando os defeitos e ampliando a possibilidade de uso do material de forma eficiente (FRIHART; HUNT, 2010).

Para confecção de elementos estruturais de madeira entender a interação entre o adesivo e a madeira é fundamental. Atualmente, o adesivo mais utilizado é o resorcinol, entretanto, o mercado de adesivos com o intuito de minimizar os impactos causados ao meio ambiente e ao homem, e diminuir os custos na colagem, tem buscado novas tecnologias, como o adesivo poliuretano a base de mamona (PETRAUSKI, 2012).

O conhecimento de fatores que influenciam na fabricação da madeira laminada colada, para o seu uso estrutural, como o tipo de espécies de interesse e sua densidade da madeira, análise de defeitos, módulo de elasticidade, classificação estrutural por método visual e mecânico das lâminas de madeira e os adesivos empregados na fabricação são de suma importância para gerar um produto de qualidade (AZAMBUJA, 2006).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Estruturas de Madeira no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro/ES.

Para realização da pesquisa foi utilizada a madeira de um híbrido de árvores de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* procedente da empresa Bahia Produtos de Madeira, localizada na cidade de Nova Viçosa, no estado da Bahia.

O lote de madeira obtido foi composto por tábuas de variadas dimensões que foram dispostas em local protegido das intempéries até que atingisse a umidade de equilíbrio com o ambiente. Posteriormente foi feita uma classificação visual e seccionamento das tábuas nas dimensões desejadas e em resíduos de variados comprimentos para produção dos calços de madeira laminada colada.

2.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira

A caracterização das propriedades físicas das tábuas foi conduzida de acordo com os métodos de ensaios definidos na Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 (ABNT, 1997), para a determinação do teor de umidade (Equação 1), densidade aparente (Equação 2) e estabilidade dimensional (Equações 3 e 4).

Para realização dos ensaios foi retirado um corpo de prova de cada tábua, totalizando 86 corpos de prova. Foram utilizados os mesmos corpos de prova para ambos os ensaios, com dimensões de 3 x 2 x 5 cm (espessura x largura x comprimento) que representam as direções radial, tangencial e longitudinal.

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que

m_i : massa inicial da madeira, em gramas;

m_s : massa da madeira seca, em gramas.

$$\rho_{ap}(\%) = \frac{m(\%)}{V(\%)} \quad (2)$$

Em que:

$m(\%)$: massa da madeira a um dado teor de umidade, em gramas;

$V(\%)$: volume da madeira a um dado teor de umidade.

$$\varepsilon_{r,12} = \left(\frac{L_{12,sat} - L_{12, sec}}{L_{123, sec}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{i,12} = \left(\frac{L_{12,sat} - L_{12, sec}}{L_{12, sat}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

ε_r : deformações específicas de retração;

ε_i : deformações específicas de inchamento;

L_{sat} : dimensões da madeira saturada;

L_{sec} : dimensões da madeira seca;

L_{12} : direções radial e tangencial.

2.2 Adesivo empregado e confecção dos elementos colados

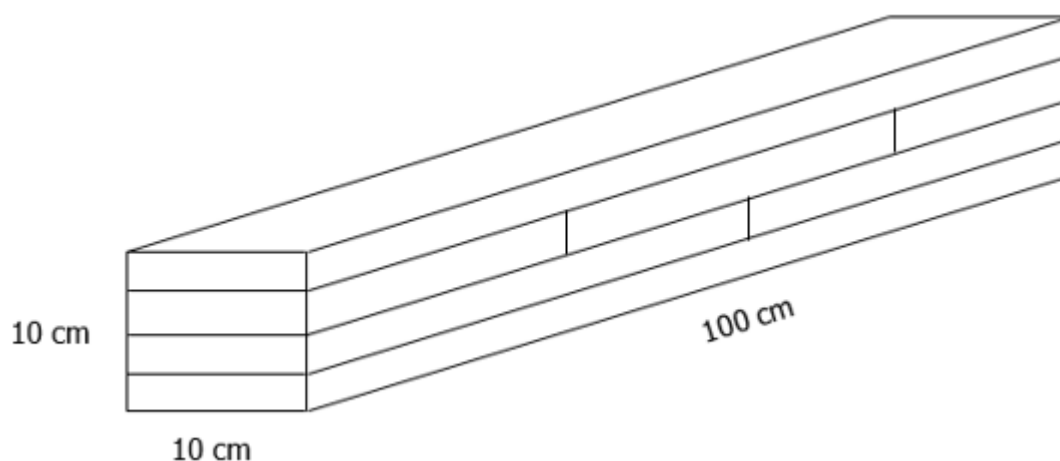
Foi utilizado o adesivo poliuretano bi componente à base de óleo de mamona (PUR). A aplicação do adesivo, a escolha do extensor e do catalizador foi mediante recomendação do fabricante. Para a aplicação do poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,2, sendo 1 parte do componente A (um pré-polímero) e 1,2 partes do componente B (um poliol).

Para produção dos calços de madeira laminada colada foi feito primeiramente uma classificação das tábuas e dos resíduos conforme sua densidade aparente. Dessa forma, realizou-se uma colagem de lâminas e resíduos com valores de densidade mais próximos.

Após a classificação das densidades, as tábuas foram transformadas em lamelas com dimensões de 2,5 x 10,5 x 105 cm (espessura x largura x comprimento) e os resíduos as dimensões de 2,5 x 10,5 cm (espessura x largura), com variados comprimentos. Para a confecção de cada calço foram unidas 2 lâminas inteiras dispostas com fibras paralelas entre si, na extremidade (Figura 1). As lâminas internas foram compostas pelos resíduos unidos por emenda de topo de forma a ficarem com o tamanho próximo a 105 cm de comprimento.

No total, 21 calços de poliuretano de mamona (PUR) foram produzidos.

Figura 1. Esquema de confecção dos calços de resíduos de MLC de eucalipto.



Fonte: O autor.

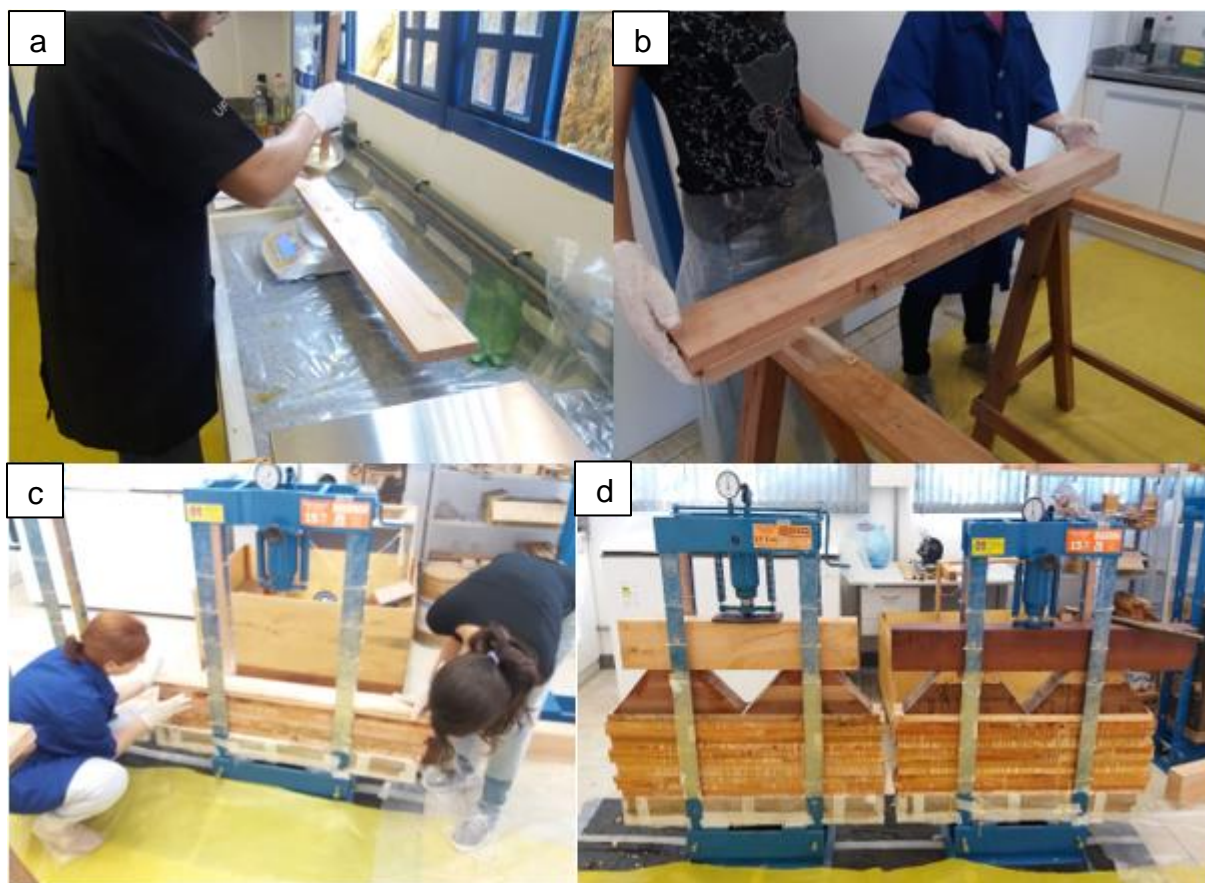
As tábuas foram coladas com gramatura igual a 300 g.m⁻² em linha de cola simples com auxílio de uma espátula, unidas e prensadas em uma prensa com

capacidade de 15 ton., durante 48 horas a uma pressão de 1 MPa e temperatura de 20 °C e umidade relativa do ar de 65%, de acordo com recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Foram utilizadas duas prensas, sendo que cada uma podia fazer três calços por vez, o que totalizou sete prensagens (Figura 2).

Após o término da prensagem, os calços de resíduos de madeira laminada colada foram dispostos em local coberto e mantidos em equilíbrio higroscópico com o meio, para que se pudesse atingir a cura completa do adesivo.

Posteriormente os calços foram levados para a marcenaria, onde foram aplainados e deixados com a dimensão final desejada de 10 x 10 x 100 cm (espessura x largura x comprimento).

Figura 2. Etapas de preparação dos blocos de madeira laminada colada. a) Aplicação do adesivo; b) Espalhamento do adesivo; c) Montagem dos calços de resíduos de madeira laminada colada - MLC; d) Aplicação de pressão constante.



Fonte: O autor.

2.3 Caracterização das propriedades mecânicas da madeira laminada colada

A caracterização das propriedades mecânicas dos calços de MLC foi realizada por meio de ensaios não-destrutivos e ensaios destrutivos. Nos ensaios não-destrutivos utilizou-se todos os calços produzidos, que foram medidos e pesados para realização dos ensaios de vibração transversal, vibração longitudinal e *Stress wave*.

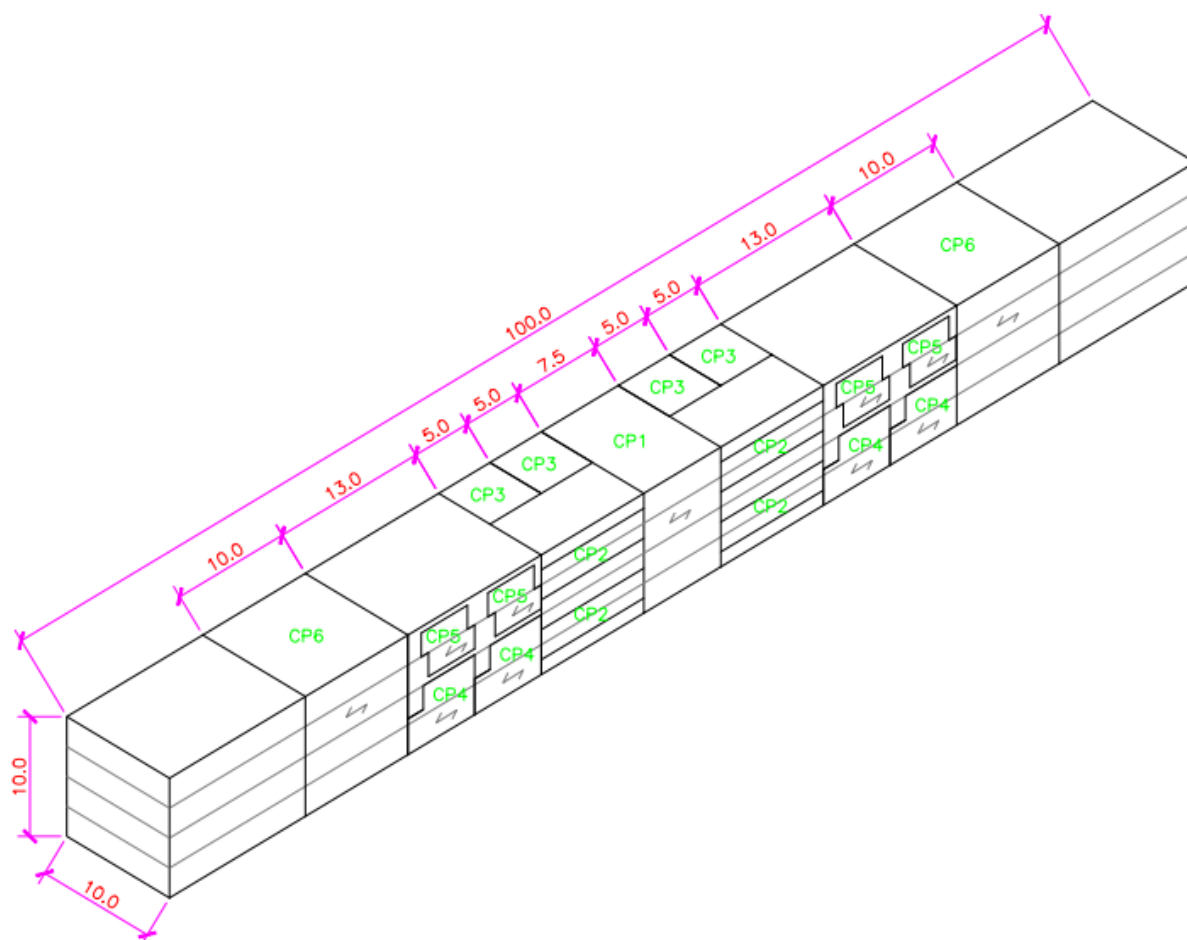
Posteriormente foi selecionado um calço de cada prensagem, totalizando sete calços de poliuretano de mamona para os ensaios destrutivos.

Foram então retirados corpos de prova de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, cisalhamento na linha de cola e delaminação.

Os ensaios foram realizados em duas condições de umidade: condição seca, em que os corpos de prova foram mantidos com teor de umidade em equilíbrio com o ambiente; e na condição saturada, em que os corpos de prova foram imersos em água por um período mínimo de duas semanas com o objetivo de elevar o teor de umidade da madeira para acima do ponto saturação das fibras ($U > PSF$).

Os corpos de prova foram retirados ao longo do comprimento dos calços conforme mostra a Figura 3.

Figura 3. Esquema de retirada dos corpos de prova dos calços de MLC (unidades em cm).



*CP 1: delaminação; CP 2: compressão paralela; CP 3: compressão normal; CP 4: cisalhamento na madeira; CP 5: cisalhamento na linha de cola; CP 6: compressão estrutural.
Fonte: O autor.

2.3.1 Ensaio de vibração transversal livre

O ensaio de vibração transversal livre foi realizado conforme instruções das normas ASTM E1876 (ASTM, 2007) e ASTM C215 (ASTM, 2008). Para a realização do experimento foi utilizado um microfone para captar a vibração devido à aplicação de um impacto, um suporte para o corpo de prova e o computador com um programa para capturar a frequência natural. Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal ($E_{a,vt}$) através da Equação 1, devido a vibração transversal livre tomou-se à primeira frequência de ressonância de vibração transversal.

$$E_{a,vt} = \frac{f_r^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g}$$

Eq. 1

Em que:

$E_{a,vt}$ = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

f_r = frequência de vibração transversal (Hz);

W = peso da peça de madeira (N);

L = distância entre apoios (m);

I = momento de inércia da seção transversal (m^4);

g = aceleração da gravidade ($9,80665 \text{ m.s}^{-2}$).

2.3.2 Ensaio de vibração longitudinal

O ensaio de vibração longitudinal foi realizado conforme instruções da norma ASTM E1876 (ASTM, 2007), no qual a direção do movimento da onda ocorre na mesma direção do modo de vibração longitudinal. O ensaio de vibração longitudinal foi realizado de forma semelhante ao de vibração transversal, mas com sentido do impacto e captação do som na direção longitudinal. No ensaio de vibração longitudinal obtém-se uma resposta acústica composta por uma ou mais frequências naturais de vibração longitudinal (DIÓGENES et al., 2011). Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal ($E_{a,l}$) por meio da Equação 2, devido a frequência longitudinal tomou-se à primeira frequência de ressonância de vibração longitudinal.

$$E_{a,l} = 4 \cdot \left(\frac{m \cdot f_1^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{l}{h} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

$E_{a,l}$ = Módulo de elasticidade dinâmico pelo método de vib. long. (MPa);

m = Massa (kg);

f_1 = Frequência de vibração longitudinal (Hz);

b = Largura (mm);

h = Altura (mm);

l = Comprimento (mm).

2.3.3 Ensaio de “stress wave”

Para a realização deste ensaio foi empregado o equipamento *FAKOPP Microsecond Timer* da empresa FAKOPP Ent., projetado para medir o tempo de propagação de ondas de tensão. O sinal é gerado por um martelo no sensor de partida e a unidade exibe o tempo de propagação medido. O equipamento conta com um martelo de impacto e uma caixa de temporizador de microssegundo, que foi acoplado aos calços com auxílio de dois sensores.

Após acoplar os transdutores em cada uma das extremidades da viga de madeira, é executada a pancada no sensor de início, de forma a transmitir a onda no sentido longitudinal.

Para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico por este método foi empregada a Equação 3.

$$E_{s,w} = v^2 \cdot \frac{\rho}{g} \cdot 10^{-5} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

$E_{s,w}$ = Módulo de elasticidade dinâmico pelo “Stress Wave Timer” (MPa);

v = Velocidade da onda na madeira (m.s^{-1});

ρ = Densidade do corpo de prova (kg.m^{-3});

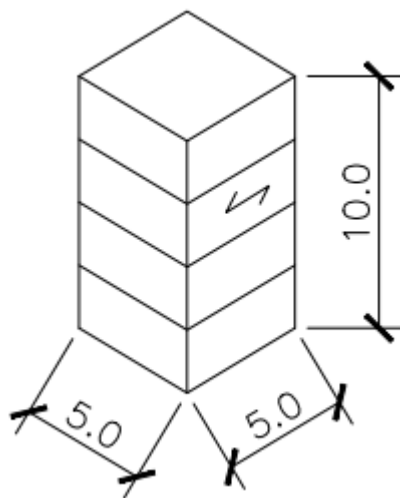
g = Aceleração da gravidade (m.s^{-2}).

2.3.4 Ensaio de compressão normal às fibras

Para o ensaio de compressão normal às fibras dos corpos de prova foi utilizada a norma da NBR 7190 (ABNT, 1997). A partir deste ensaio determinou-se o módulo de elasticidade na direção normal às fibras e a resistência à compressão normal às fibras.

As dimensões dos corpos de prova de compressão normal às fibras, obtido a partir dos calços de MLC, para a realização dos ensaios secos e saturados, são demonstrados na Figura 4.

Figura 4. Representação do corpo-de-prova de compressão normal às fibras (unidades em cm).



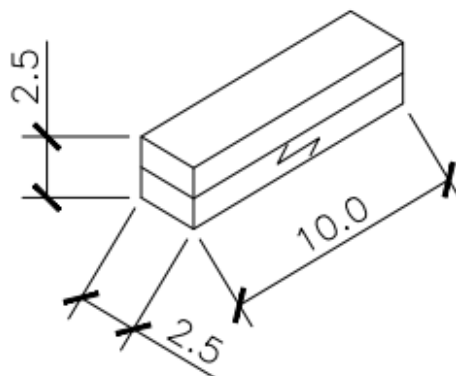
Fonte: O autor.

2.3.5 Ensaio de compressão paralela às fibras

Para o ensaio de compressão paralela às fibras, foram aplicados os métodos de ensaio da norma ASTM D143 (ASTM, 2000). A partir deste ensaio determinou-se o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras.

As dimensões dos corpos de prova de compressão paralela às fibras, obtido a partir dos calços de MLC, para a realização dos ensaios secos e saturados, são demonstrados na Figura 5.

Figura 5. Representação do corpo-de-prova de compressão paralela às fibras (valores em cm).



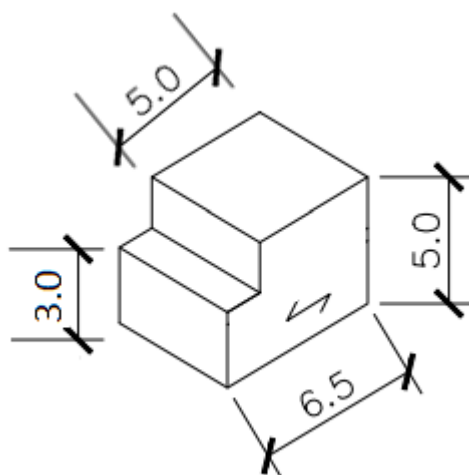
Fonte: O autor.

2.3.6 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

No ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, utilizou-se os métodos de ensaio da norma ASTM D143 (ASTM, 2000) para determinação da resistência.

Na Figura 6 estão apresentadas as dimensões e as configurações para os corpos de prova confeccionados.

Figura 6. Representação do corpo-de-prova de cisalhamento paralelo às fibras (valores em cm).



Fonte: O autor.

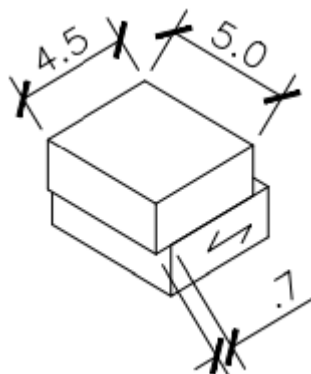
2.3.7 Ensaio de cisalhamento na linha de cola

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola, o procedimento de teste foi realizado de acordo com a norma ASTM D 905 – Standard Test for Strenght Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading (ASTM, 2009).

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola foi quantificado a percentagem de falhas na madeira com o auxílio de uma lâmina quadriculada transparente, com precisão de 1% (38,1 x 50,8 mm). As avaliações da percentagem de falhas na madeira foram realizadas conforme a norma ASTM D 905 (ASTM, 2009).

Na Figura 7 estão apresentadas as dimensões dos corpos de prova usados neste ensaio.

Figura 7. Representação do corpo-de-prova de cisalhamento na linha de cola (valores em cm).



Fonte: O autor.

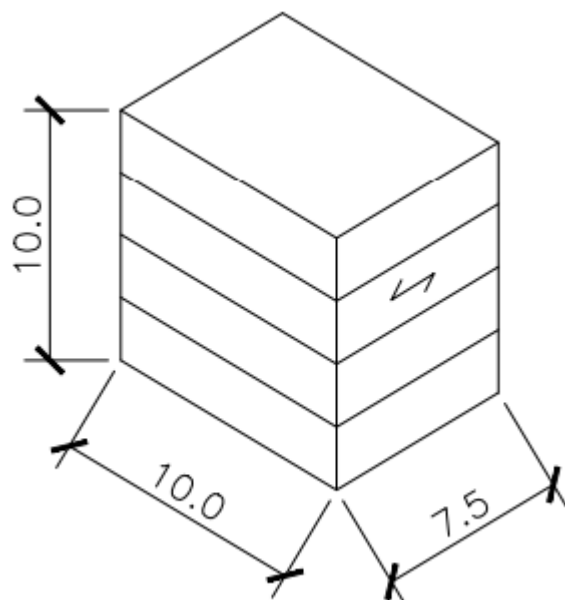
2.3.8 Ensaio de delaminação

O ensaio de delaminação foi realizado conforme as recomendações da norma AITC T110, da *American Institute of Timber Construction* - AITC (2007). O ensaio consistiu em colocar os corpos de prova dentro de uma autoclave (Figura 8), expondo as linhas de cola a tensões devido ao efeito de vácuo e pressão, em três ciclos de umedecimento e secagem.

Na primeira etapa do ensaio, os corpos de prova foram inseridos na autoclave para aplicação de vácuo de 75 ± 10 kPa, durante 2 horas, depois liberou-se o vácuo e aplicou-se água com pressão de 540 ± 20 kPa durante 2 horas. Este mesmo procedimento foi repetido na segunda etapa, totalizando 8 horas de permanência na autoclave e, então, os corpos de prova foram retirados da autoclave e colados para secar ao ar livre, no primeiro ciclo. No segundo e terceiro ciclos foram repetidos os mesmos procedimentos do primeiro ciclo. Ao final do ensaio, avaliou-se o comportamento da combinação da madeira colada exposta ao exterior, por meio da porcentagem de delaminação, que foi obtida nas duas faces de topo dos corpos de prova.

Figura 8. a) Representação do corpo-de-prova de delaminação (unidade em cm); b) Autoclave utilizada.

a



Fonte: O autor.

2.4 Análise estatística

O experimento foi realizado em um delineamento inteiramente casualizado, sendo o adesivo em dois níveis e a condição de umidade em dois níveis. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade de erro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físicas da madeira

Os valores médios das tábuas de madeira de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* obtidos nos ensaios de densidade aparente, teor de umidade e estabilidade dimensional estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios para a densidade aparente, teor de umidade, retração e inchamento tangencial e radial para a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*.

Densidade (g.cm ⁻³)		Teor de umidade (%)	
0,621 (0,115)		11,842 (0,899)	
Estabilidade dimensional			
Retração		Inchamento	
Tangencial	Radial	Tangencial	Radial
8,750 (1,583)	5,976 (1,600)	9,621 (1,901)	6,387 (1,844)
Fator anisotrópico (T/R)			
1,464 (0,989)			

*T = Tangencial; R = Radial; valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: O autor.

O valor médio de densidade aparente obtido das tábuas de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* foi 0,621 g.cm⁻³. Esse valor foi semelhante aos encontrados por Segundinho et al. (2018), que encontraram uma média de 0,635 g.cm⁻³ e 0,682 g.cm⁻³ para os dois lotes de madeira de *Eucalyptus* sp. Já Evangelista et al. (2010) obtiveram uma densidade aparente média de 0,55 g.cm⁻³ para *Eucalyptus urophylla*.

A densidade média e o teor de umidade médio apresentado na (Tabela 1) estão de acordo com os valores estabelecidos por Miotto e Dias (2009) para produção de madeira laminada colada.

Os valores médios encontrados para contração tangencial e radial foram próximos aos encontrados por outros pesquisadores (ELEOTÉRIO et al., 2015; CRUZ et al., 2003; EVANGELISTA et al., 2010).

Quanto ao coeficiente de anisotropia, Alves et al. (2017) obtiveram um valor de 1,6 e Torres et al. (2016) um valor igual a 1,55 para *Eucalyptus camaldulensis*. Mesmo as espécies de *Eucalyptus* sendo pouco estáveis dimensionalmente, elas podem apresentar coeficientes de anisotropia semelhantes a espécies com maior estabilidade dimensional, como o cedro (1,50) por exemplo (ROCHA, 2000).

3.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira laminada colada

3.2.1 Ensaio não destrutivos

Os valores médios dos módulos de elasticidade dos calços de resíduos de MLC de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*, obtidos pelos ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal e *Stress wave* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios dos módulos de elasticidade obtidos por ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal e “*Stress wave*” na madeira laminada colada.

PUR		
VL (GPa)	VT (GPa)	Stress wave (GPa)
16,53 (2,06) a	13,32 (1,83) c	14,60 (1,70) b

PUR: Adesivo poliuretano de mamona; VL: Vibração longitudinal; VT: Vibração transversal. Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão. * Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O autor.

O maior módulo de elasticidade médio foi obtido por meio do ensaio de vibração longitudinal (16,53 GPa), para vibração transversal o módulo foi igual a 13,32 GPa e correspondeu a menor média de MOE e no ensaio de *Stress wave* obteve-se um módulo de 14,60 GPa. Santos (2014) encontrou módulos iguais a 18,07 GPa para vibração longitudinal, 17,71 GPa para vibração transversal e 14,98 GPa no ensaio de *Stress wave* em vigas de MLC de eucalipto.

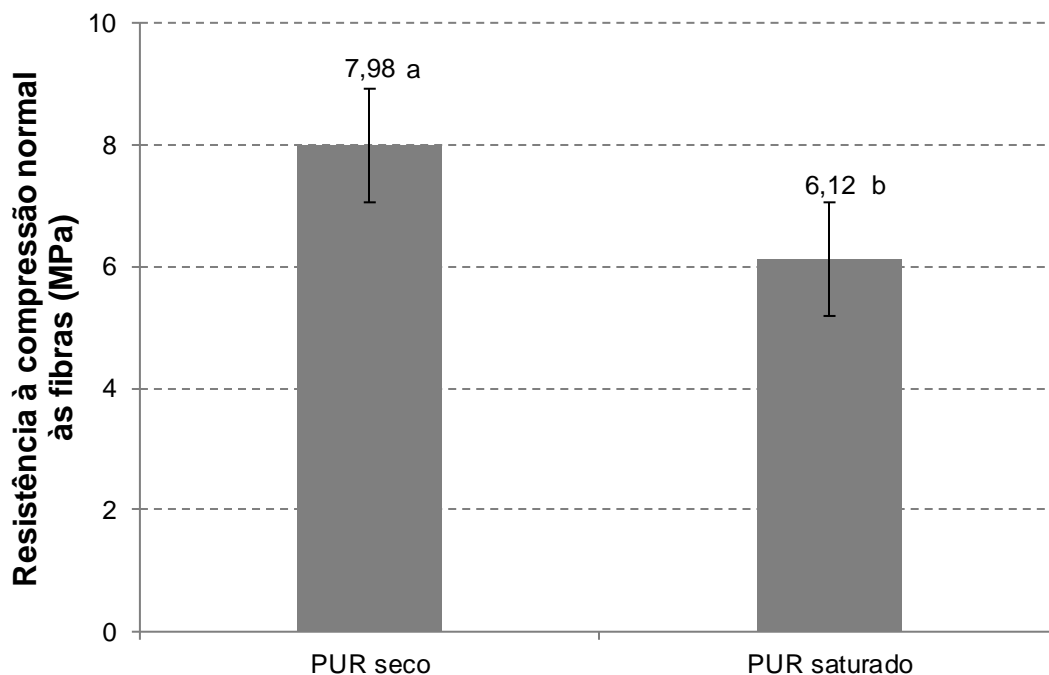
Candian e Sales (2009) encontraram um valor médio para o módulo de elasticidade dinâmico igual a 14,97 GPa obtido com a técnica de vibração transversal em madeira de *Eucalyptus citriodora*. Enquanto no estudo de Targa et al. (2005), o módulo médio correspondeu a 16,99 GPa para *Eucalyptus grandis*.

O módulo de elasticidade determinado por meio do *Stress wave timer* foi superior ao encontrado por Cunha e Matos (2010), onde o valor foi 7,27 GPa e 7,76 GPa para vigas de MLC.

3.2.2 Compressão normal às fibras

Os resultados obtidos para compressão normal às fibras nos corpos de prova dos calços de resíduo na condição seca e saturada podem ser observados na Figura 9.

Figura 9. Valores médios de resistência à compressão normal às fibras.



Fonte: O autor.

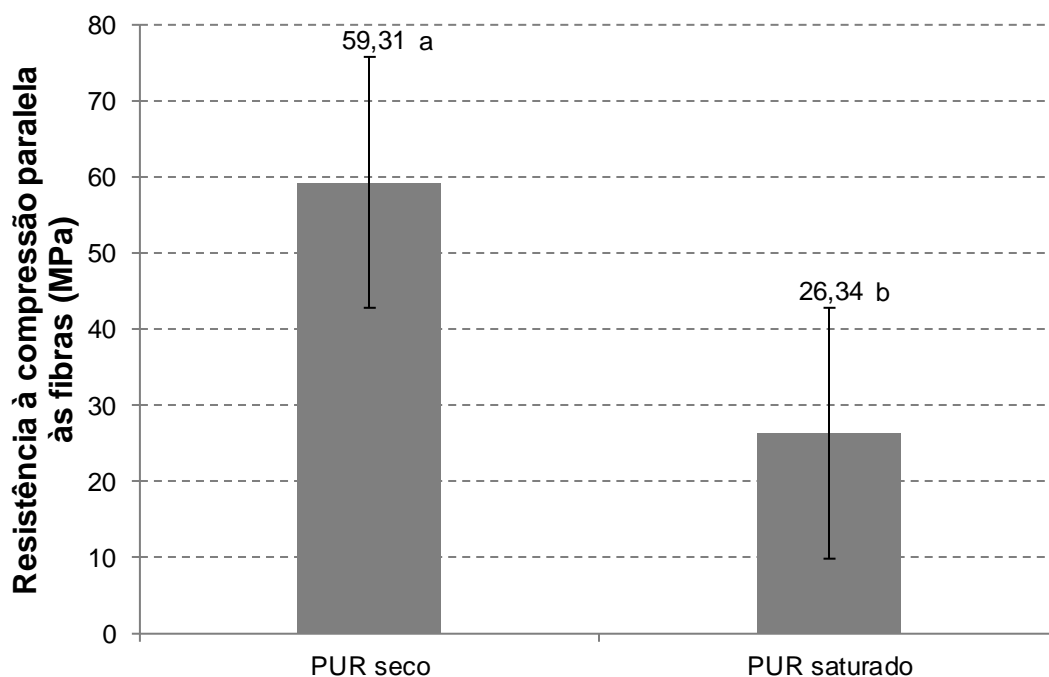
A maior resistência à compressão normal às fibras resultou dos corpos de prova ensaiados na condição seca (7,98 MPa), sendo 23,3% superior que aqueles na condição saturada (6,12 MPa). Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira (2018), onde o adesivo poliuretano na condição seca teve uma resistência igual a 8,26 MPa e na condição saturada 5,37 MPa.

Ao estudar o efeito do teor de umidade sobre a resistência da madeira, Madsen (1992), concluiu que a resistência à compressão normal às fibras é altamente sensível a alteração do teor de umidade.

3.2.2 Compressão paralela às fibras

Os valores obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras nos corpos de prova dos calços de resíduo na condição seca e saturada podem ser observados na Figura 10.

Figura 10. Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras.



Fonte: O autor.

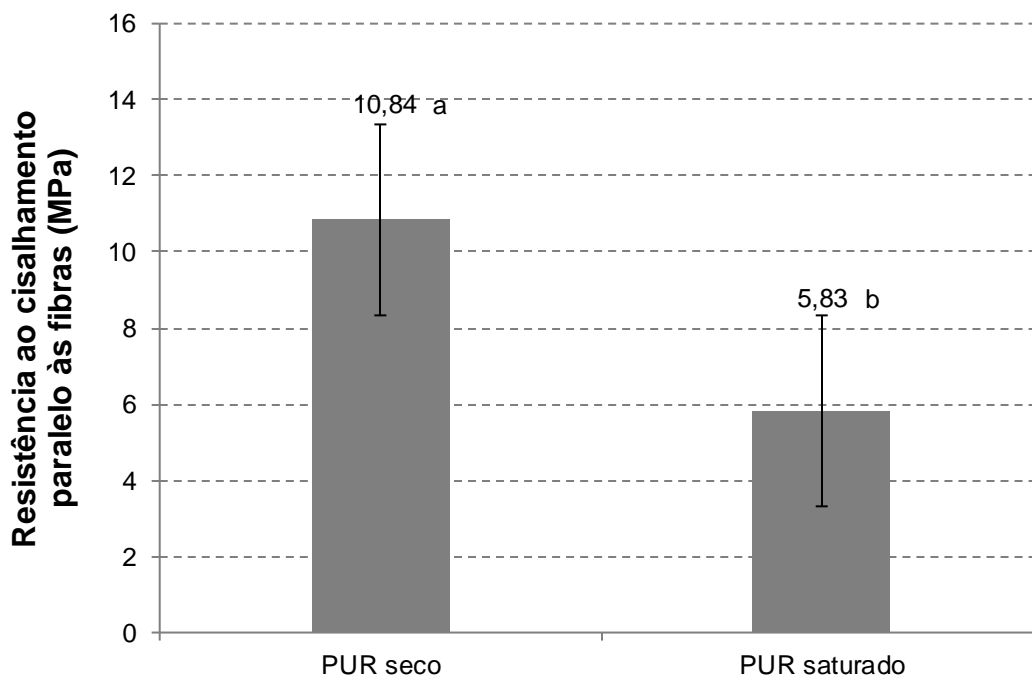
Para a compressão paralela às fibras, o poliuretano na condição seca novamente obteve a maior média (59,31 MPa), que foi 55,59% maior que o PUR saturado (26,34 MPa). Valores semelhantes foram encontrados por Segundinho et al. (2015), 52,72 MPa para PUR seco e 29,88 para PUR saturado.

CRUZ et al. (2003) avaliaram sete clones de Eucalyptus com idades de 5,5 a 10,5 anos e relataram resistência à compressão variando de 40 MPa a 52 MPa. No estudo de Josino (2014), a resistência à compressão paralela à 12% de umidade foi de 52,1 MPa, já para a madeira saturada esse valor foi 32,1 MPa.

3.2.3 Cisalhamento paralelo às fibras da madeira

Na figura 11 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova dos calços de resíduo secos e saturados.

Figura 11. Valores médios de resistências ao cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: O autor.

Como pode-se observar, a maior média de resistência ao cisalhamento na madeira correspondeu aos corpos de prova ensaiados na condição seca que foram 46,21% superiores que os ensaiados na condição saturada.

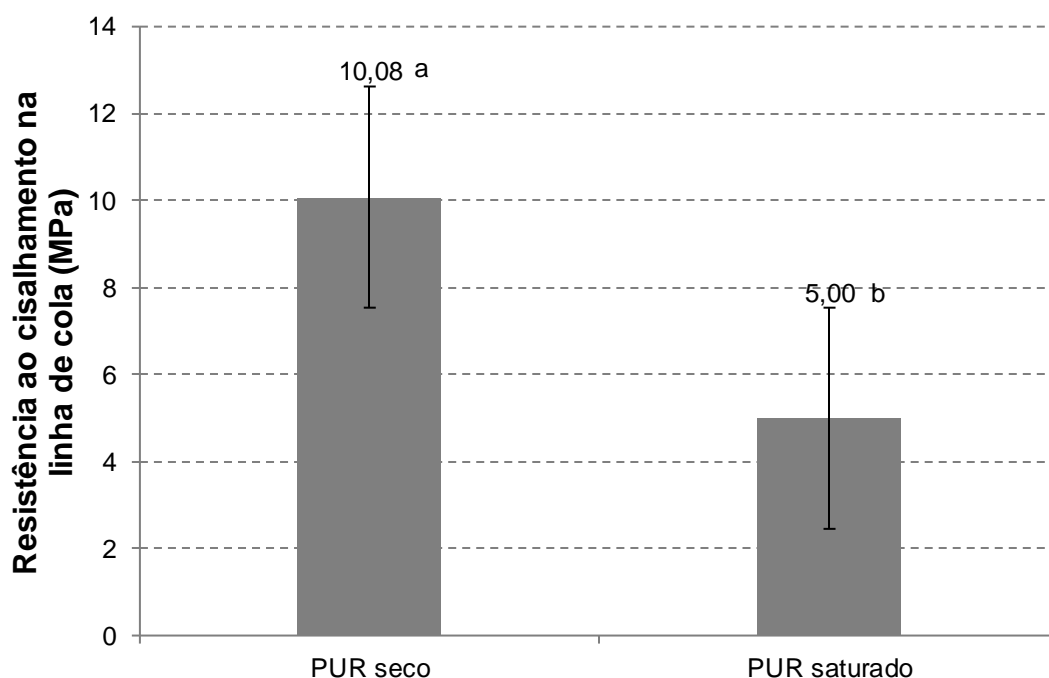
Matos e Molina (2016) estudando a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para madeira de *Eucalyptus saligna* com 12% de umidade encontrou uma média de 12,98 MPa. Enquanto Oliveira (2018) obteve uma resistência de 10,45 MPa para PUR seco e 8,16 para PUR saturado.

A resistência ao cisalhamento na madeira está diretamente relacionada a direção em que a tensão é aplicada em relação aos anéis de crescimento da madeira. Na direção tangencial tem grande influência da diferença entre o lenho tardio e inicial. Já na face radial é influenciado pela espessura dos raios, em que raios largos apresentam uma menor resistência (MORESCHI, 2005).

3.2.4 Cisalhamento na linha de cola

Na Figura 12 estão descritos os resultados para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Figura 12. Valores médios de resistências ao cisalhamento na linha de cola.



Fonte: O autor.

O adesivo poliuretano de mamona na condição de umidade seca (10,08 MPa) apresentou um melhor desempenho, sendo 50,39% maior que o adesivo na condição saturada (5,00 MPa). A média da resistência na linha de cola dos corpos de prova saturados foram menores que a dos corpos de prova secos, confirmando que o teor de umidade tem influência nas propriedades mecânicas da madeira e seus derivados (LOGSDON; CALIL JUNIOR, 2002).

Corroborando com este estudo Bianche (2014), estudando o adesivo poliuretano de mamona bicomponente encontrou valor igual a 7,04 MPa para o teste de cisalhamento na linha de cola com a condição seca e 5,34 MPa para o tratamento úmido.

O percentual de falha na madeira é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Média para o percentual de falha na madeira.

Tratamento	Condição seca	Condição saturada
	Falha na madeira (%)	Falha na madeira (%)
PUR	91,07 a	27,57 b

* Médias seguidas por mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste F ($p > 0,05$).

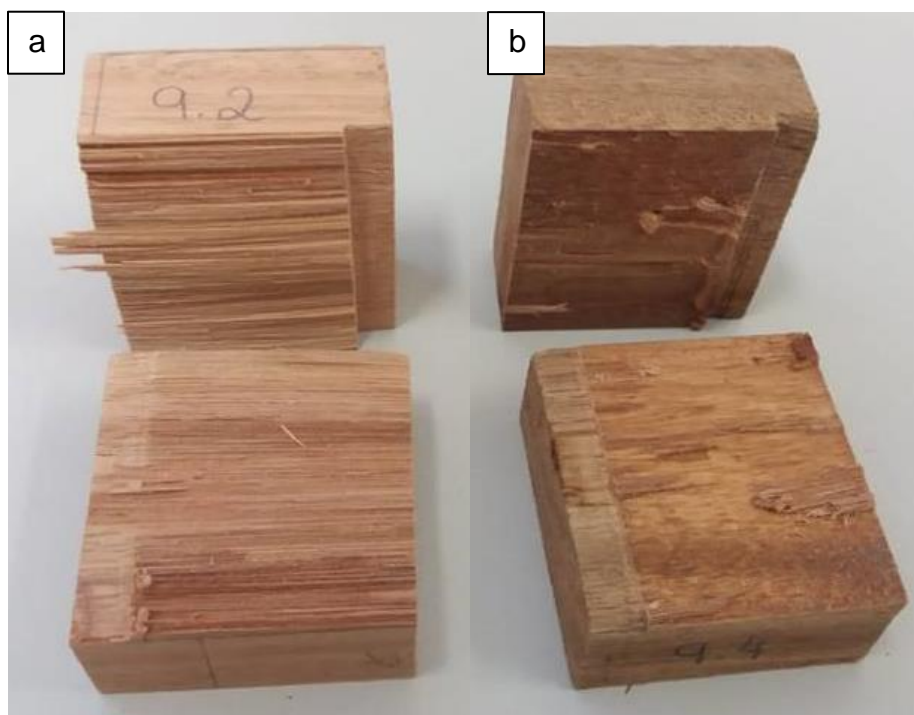
Fonte: O autor.

Pode-se observar que os corpos de prova ensaiados na condição seca obtiveram 91,07% de falha na madeira, enquanto os corpos de prova ensaiados na condição saturada tiveram apenas 27,57% de falha na madeira (Figura 13). Quanto maior é a porcentagem de falha na madeira, maior é a resistência da linha de cola e a eficiência do adesivo em relação a resistência da madeira. As tensões geradas na linha de cola se manifestam através de tensões de cisalhamento no plano da ligação adesiva e no sentido perpendicular ao mesmo (PINTO, 2011).

Segundinho et al. (2015) obtiveram 26,63% de falha na madeira para o adesivo poliuretano na condição seca e 22,42% na saturada. Já no estudo de Segundinho et al. (2018) foram encontradas falhas de 79,58% para PUR seco e 13,90 para PUR saturado na madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. Enquanto que para Bianche et al. (2017) a falha foi 64,28% para o adesivo de mamona seco e 7,85% para o adesivo na condição úmida. Esses valores confirmam a baixa resistência do adesivo poliuretano em condições de elevada umidade.

O adesivo de poliuretano é considerado um semi-estrutural (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Os adesivos semi-estruturais possuem limitações para uso externo em virtude de sua menor resistência à água em relação aos estruturais.

Figura 13. Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola. a) Condição de umidade - seca; b) Condição de umidade - saturada.



Fonte: O autor.

3.2.5 Delaminação

A porcentagem de delaminação foi determinada pela relação entre o comprimento máximo de delaminação de uma linha de cola e o comprimento da linha de cola. Foi encontrada neste estudo uma delaminação média dos corpos de prova de 34,89%.

Segundinho et al. (2015) avaliando a delaminação de vigas de MLC de *Eucalyptus* sp. obteve um valor de 23%, que apesar de inferior ao deste estudo também não está dentro do estabelecido por norma.

A avaliação da eficiência destes adesivos, quando submetidos a variações de umidade, pressão e temperatura são de fundamental importância para garantir a integridade do elemento estrutural em MLC durante a vida útil da construção (FIORELLI; DIAS, 2005).

Os corpos de prova retirados dos calços de MLC colados com adesivo poliuretano, quando submetidos a ensaios de delaminação apresentaram um comportamento ineficiente da linha de cola. As diferentes formas em que a delaminação ocorreu podem ser observadas (Figura 14).

Figura 14. Corpos de prova após o ensaio de delaminação apresentando falha na linha de cola.



Fonte: O autor

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

O adesivo poliuretano (PUR) de mamona apresenta resultados satisfatórios em termos de resistência para os ensaios mecânicos na condição seca;

A alta porcentagem de delaminação do PUR limita seu uso em ambientes de elevada umidade (saturado), o que é confirmado pela baixa porcentagem de falha na madeira na condição saturada;

Para as propriedades físicas, a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* mostrou-se ser adequada para a confecção de elementos de madeira laminada colada, tendo valores de densidade, teor de umidade e coeficiente de anisotropia dentro dos limites, conforme literatura.

5. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **T110**: Test Methods for Structural Glued Laminated Timber. Colorado, 2007.

ALVES, R. C.; OLIVEIRA, A. L. C.; CARRASCO, E. V. M. Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **Floram**, Seropédica, v. 24, e00015312, 2017.

ASTM - AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM E1876 – 07**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Philadelphia, PA. 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM C215 – 08**: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Philadelphia, PA. 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 143**: Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, PA, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Philadelphia, PA, 2009.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5266**: Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints. Philadelphia, PA, 1999.

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 159 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; LUCIA, R. M. D. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, 2017.

CALIL NETO, C. **Ligações com Parafusos AutoAtarraxantes sem Pré-Furação para uso em Estruturas de Madeira**. 2014. 328 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 83-98, 2009.

CRUZ, C. R.; LIMA, J. T.; MUNIZ, G. I. B. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 33-37, 2003.

CUNHA, A. B. da; MATOS, J. L. M. de. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("stress wave timer"). **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 345-354, 2010.

ELEOTÉRIO, J. R.; REICHERT, D.; HORNBURG, K. F.; MENEGUELLI, I. Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 329-336, 2015.

EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; LUCIA, R. M. D.; LOBO, L. M.; SOUZA, M. O. A. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no sentido radial e longitudinal. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2 p. 1-19, 2010.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. **Adhesives with wood materials bond formation and performance**. Madison: Forest Service, 2010, Chap. 10 (USDA FPL General Technical Report, 190).

FOREST PRODUCTS LABORATORY (FAO). **Wood handbook: wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. WI: Madison, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010. 508 p.

JOSINO, M. N. **Relação da resistência com a umidade e com a densidade da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla***. 2014. 39 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

LIMA, R. R. M. **Comparação de métodos de colagem para madeira de *Pinus* sp.** 2016. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2016.

LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 18, p. 77-107, 2002.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of Timber**. North Vancouver, British Columbia. Canada. Timber Engineering Ltd, 405p., 1992.

MATOS, G. S. MOLINA, J. C. Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190:1997 e ISO 13910:2005. **Revista Matéria**, v. 21, n. 4, p. 1069-1079, 2016.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**, 4ª edição, Curitiba, 2005.

OLIVEIRA, R. G. E. **Avaliação da madeira laminada colada à compressão normal às fibras**. 2018. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

PETRAUSKI, S. M. F. C. **Desenvolvimento de pórticos de madeira laminada colada de eucalipto, utilizando adesivos à base de resorcinol e óleo de mamona**. 2012. 139 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

PINTO, J. A. **Análise da viabilidade do uso da madeira de *Cryptomeria japonica* para laminação e produção de painéis compensado**. 2011, 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ROCHA, M.P. ***Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias**. Curitiba, 2000. 18 5f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, 2000.

SANTOS, L. L. **Aplicação de diferentes técnicas de microscopia para análises da região adesiva em madeira lamelada colada**. Vitória, 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Vitória, 2014.

SEGUNDINHO, P. G. A.; FRANÇA, L. C. A.; NETO, P. N. M.; GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S. Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 533-540, 2015.

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.

TORRES, P. M. A.; PAES, J. B.; NASCIMENTO, J. W. B.; BRITO, F. M. S. Caracterização Físico-Mecânica da Madeira Jovem de *Eucalyptus camaldulensis* para Aplicação na Arquitetura Rural. **Floram**, Seropédica, v. 23, n.1, p. 109-117, 2016.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Com base nos resultados obtidos nesse estudo pode-se concluir que:

A madeira do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* apresentou propriedades físicas que permitem sua utilização na fabricação de calços de MLC;

Os adesivos PUR e RF apresentam resultados de resistência semelhantes, apresentando melhor desempenho quando ensaiados em condição seca;

A madeira quando ensaiada em condição saturada apresenta uma queda em sua resistência em todas as propriedades testadas;

Os calços produzidos com resíduos sólidos de eucalipto possuem boas propriedades mecânicas, sendo uma excelente alternativa de uso;

A delaminação dos corpos de prova de lâminas contínuas, tanto de PUR quanto de RF, foi menor que a apresentada nos calços de resíduos utilizando PUR;

Estudos a respeito de MLC de eucalipto, principalmente em ambiente saturado, ainda estão em fase inicial, sendo necessário maiores investimentos em pesquisa para essas condições de uso.